

doi: 10.3788/gzxb20124102.0205

一种基于梯度的直线段检测算法

覃勋辉, 马戎, 付维平, 李岁劳

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘 要:针对传统直线段检测算法计算量大、鲁棒性差的不足,本文提出了一种在数字图像中检测直线段的算法.图像梯度对于检测图像中的边缘结构具有重要意义,算法首先求取图像梯度的模值和方向;然后根据梯度模值伪排序结果采用梯度区域增长方法扩张方向一致的邻域像素,得到的连通像素区域作为直线段候选区域;最后用外接矩形描述候选区域,其长轴和短轴可作为直线段判定标准,满足判定标准的长轴就是所求的直线段,并用 MATLAB 对图像进行仿真实验.结果表明:本文算法耗时 8.87 s 检测出了 108 条直线段,与传统算法相比,不但耗时降低了 17%,而且检测出的直线段增加了 16%.

关键词:直线段检测; 图像梯度; 区域增长; 外接矩形

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0205-5

0 引言

直线段检测在数字图像处理和计算机视觉领域中都具有十分重要的意义,比如视觉导航过程拍摄的道路图像的直线段可用于车道线重建、道路消失点估计^[1]和运动状态估计^[2].传统的直线段检测方法主要以 Hough 变换方法为代表.基于 Hough 变换检测直线段的方法^[3-4]具有强鲁棒性,但是它所要求的巨大计算量却阻碍了其在实时性很高领域的应用.此外, Hough 具有以下不足:1)全局投票方案的检验准确度与参量空间的量化误差有关;2)参量空间的中所有边缘点对参量空间投票贡献相等^[5],即使是一副高斯白噪音图像也会检测出直线段;3) Hough 变换更适合于全局的直线段检测而不是局部直线段检测.

图像梯度信息也可用于直线段检测.文献^[6]提出了一种基于梯度的检测图像中边缘结构方法,其基本思想是拥有一致梯度方向的像素队列很有可能是某物体的边缘.文献^[7]引入神经感知学理论设置梯度阈值促进了基于梯度的检测图像边缘结构方法的发展.文献^[8]提出了一种基于梯度的多直线段检测方法,算法检测直线段效果良好,但其巨大的计算量阻碍了它的应用.文献^[9-10]提出了一种更快速的基于假设检验的直线段检测方法,该算法鲁棒性

高、计算量降低、检测效果好.但是它仍然存在以下不足:1)将直线段候选区域的形心作为外接矩形的中心导致直线段端点的计算值不准确;2)使用 Helmholtz Principle^[11]判定直线段需要很大计算量,当外接矩形很大时可能计算溢出导致直线段判断失误.

本文提出了一种快速准确的能够在多种复杂场景中检测直线段的算法.相对于文献^[10]的算法,本文作了三点改进:1)算法采用了梯度模值伪排序方法代替快速排序法;2)引入了一种新的计算候选区域外接矩形的方法;3)使用外接矩形长短轴之比代替 Helmholtz Principle 判定直线段结构.

1 图像的梯度

图像的梯度反映相邻像素间灰度值的变化,计算图像梯度对于检测图像中的边缘结构具有重要意义.对于数字图像 I 中像素 (x, y) ,其梯度 $g(x, y)$ 可定义为

$$g(x, y) = [I(x+1, y) - I(x-1, y)] * i + [I(x, y+1) - I(x, y-1)] * j \quad (1)$$

式中, $I(x, y)$ 为像素 (x, y) 的灰度值, i, j 是图像坐标系的两个方向.梯度的模值和方向分别为

$$mg(x, y) = \sqrt{(g(x, y, 1))^2 + (g(x, y, 2))^2} \quad (2)$$

$$\tan(\theta) = \frac{g(x, y, 2)}{g(x, y, 1)} \quad (3)$$

基金项目:航空科学基金(No. 20090753008)和航天科技创新基金(No. casc0209)资助

第一作者:覃勋辉(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、视觉导航. Email: qinxunhui@126.com

导师:马戎(1963-),女,副教授,主要研究方向为精密传感器、组合导航. Email: marong@nwpu.edu.cn

收稿日期:2011-09-09; **修回日期:**2011-11-14

式中, $g(x, y, 1)$ 和 $g(x, y, 2)$ 分别是像素 (x, y) 在 i, j 方向上的梯度值, $mg(x, y)$ 是 $g(x, y)$ 的模值, $\tan(\theta)$ 是梯度方向角的正切值. 图 1 为一幅拥有明显边缘结构的图片, 通过式(1)~(3)可以计算出图像的梯度大小和方向, 如图 1(a)所示.

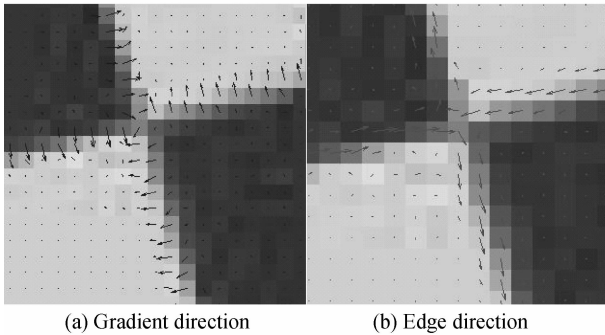


图 1 图像梯度
Fig. 1 Image gradient

由图 1(a)可以看出, 在边缘处梯度模值较大, 方向趋于一致, 且梯度方向和边缘延伸的方向正好垂直. 所以, 将图 1(a)中的梯度方向逆时针旋转 90° . 即为图 1(b)所示的边缘延伸方向. 本文将梯度逆时针旋转 90° 后视为梯度^[10]. 新的梯度计算公式为

$$g(x, y) = -[I(x, y+1) - I(x, y-1)] * i + [I(x+1, y) - I(x-1, y)] * j \quad (4)$$

在数字图像处理技术中, 若有两像素点的梯度方向之差 $\text{derection}(g(x_1, y_1), g(x_2, y_2)) < 2\pi/n$, 则可认为在方向准确度为 n 时两像素的梯度方向一致. 根据神经感知学理论^[7] 以及数值实验, 通常 n 取 $8 \sim 16$.

2 直线段候选区域

2.1 梯度模值伪排序

梯度邻域的增长或合并是一种全局的遍历算法, 因此处理像素的顺序会影响到处理结果. 通常较高梯度模值的像素点对应着较强的边缘, 而且边缘中心位置处的梯度模值也会更大, 所以一种符合常理的方法是从一个具有较大梯度模值的像素开始梯度邻域增长. 这就需要对像素首先按照梯度模值排序, 然而对图像来说这是不太现实的, 因为对于大小 $N \times N$ 的图像来说采用快速排序法时间复杂度大于 $\log_2 N * N^3$. 对于 $N > 512$ 的图片, 可以采用一种计算量小的伪序法^[12] 代替快速排序法. 伪序法首先按照梯度模值的最大和最小值线性生成一个区间, 将每一个像素按照梯度大小放入对应区间内. 对于灰度级为 $0 \sim 255$ 的图像来说, 512 分辨率的区间便可以很好的对像素梯度模值进行排序, 同一区间内的像素认为梯度模值相差很小, 以同等的概率用来作

为邻域增长的种子.

2.2 区域增长策略

按照伪序排列结果, 选取种子像素按照区域增长策略计算直线段候选区域. 设种子点的梯度为 $g(1) * i + g(2) * j$, 如果邻域像素 (x, y) 方向与梯度方向一致即方向之差不超过阈值 $2\pi/n$, 则将该像素加入到区域中, 区域梯度的更新公式为

$$g(1) = g(1) + g(x, y, 1), g(2) = g(2) + g(x, y, 2) \quad (5)$$

当没有新的像素增加到区域中时, 该种子像素区域增长过程结束, 开始下一个种子点. 值得说明两点: 1) 所有的像素点最多被访问一次, 访问过的像素点不能够再被访问; 2) 梯度模值小于设定的梯度阈值的像素不能够被访问. 梯度阈值可以根据实际需求选取, 阈值越大提取到的边缘越明显, 候选区域包含的像素个数越少. 反之, 候选区域包含的像素个数越多, 计算量也增大. 通常, 选取一个择中的梯度阈值 $5/\sin(2\pi/n)$ ^[7].

图 2 是由区域增长策略生成的直线段候选区域结果, 该结果表示了图像中的边缘结构. 对于复杂环境含有大量噪音的图像, 区域增长策略也能够检测图像中的边缘结构. 通过梯度区域增长策略检测到的边缘结构是连通的, 相对传统的边缘检测方法 CANY 算子或 SOBEL 算子, 其结果更便于后续处理.

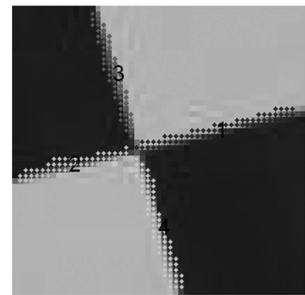


图 2 区域增长结果
Fig. 2 Region-growing results

3 直线段描述和判定

当划分出直线段的候选区域后, 要根据整个区域计算一条这个区域对应的直线段. 最简单的方法是直接利用最小二乘法拟合直线, 但这样简单的操作会检测出许多错误的直线段. 由于并不是所有的候选区域都对应直线段模型, 所以本文选用外接矩形描述和判定候选区域. 由区域中像素的坐标值容易计算整个区域的形心, 矩形两个垂直边的方向由区域的长轴和短轴方向确定, 矩形的长和宽取为最小的可以覆盖整个区域矩形的值. 当外接矩形的长短轴之比大于设定阈值则认为候选区域对应直线

段,此时矩形的长轴就是要计算的直线段.比如,图2中的直线段候选区域“1”可由一个相应的外接矩形描述,如图3所示.

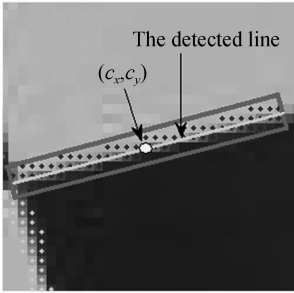


图3 外接矩形描述候选区域

Fig. 3 The enclosing rectangle describing the candidate region

图3中, (c_x, c_y) 是直线段候选区域“1”的形心.根据区域中像素的坐标值可计算矩阵的长轴和短轴,若图3中矩形的长轴和短轴之比大于设定的阈值,则长轴就是区域所对应的直线段.

3.1 计算区域的形心

$$c_x = \frac{\sum_{k=1}^{\text{num}} x_k}{\text{num}}, c_y = \frac{\sum_{k=1}^{\text{num}} y_k}{\text{num}} \quad (6)$$

式中, (c_x, c_y) 是候选区域的形心, (x_k, y_k) 是区域中第 k 个像素的坐标值,num是区域所包含的像素个数.

3.2 计算长轴的方向

计算式(7)矩阵的特征值和特征向量,对应较大特征值的特征向量方向就是矩形的长轴的方向.

$$M = \begin{bmatrix} m^{xx} & m^{xy} \\ m^{xy} & m^{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{式中, } m^{xx} = \frac{\sum_{k=1}^{\text{num}} (x_k - c_x)^2}{\text{num}},$$

$$m^{xy} = \frac{\sum_{k=1}^{\text{num}} (x_k - c_x)(y_k - c_y)}{\text{num}}, m^{yy} = \frac{\sum_{k=1}^{\text{num}} (y_k - c_y)^2}{\text{num}}.$$

设上述求解得到的特征值为 $a, b (b > a)$,对应的特征向量分别为 $(a_1, a_2)^T$ 和 $(b_1, b_2)^T$.矩阵的特征值反映的是长轴和短轴两个方向上像素的分布情况,由特征向量可以计算出外接矩阵短轴和长轴的方向(斜率),分别为

$$k_1 = \tan(\theta_1) = a_2/a_1, k_2 = \tan(\theta_2) = b_2/b_1 \quad (8)$$

3.3 计算长轴的两个端点

过区域形心 (c_x, c_y) 的长轴直线解析式为: $y - c_y = k_2(x - c_x)$,整理为点斜式为: $y = k_2 * x + c_y - k_2 * c_x$.同理短轴的解析式为: $y = k_1 * x + c_y - k_1 * c_x$.由式(9)和(10)可以计算长轴的两个端点坐标 p_1 和 p_2

$$p_1 = (c_x, c_y) + d_1 * (b_1, b_2) \quad (9)$$

$$p_2 = (c_x, c_y) + d_2 * (b_1, b_2) \quad (10)$$

$$\text{式中, } d_{1,2} = \min, \max \left\{ \frac{(y_k - k_1 * x_k + c_y - k_1 * c_x)}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \right\}.$$

同理,也容易计算短轴的两个端点值.另外,对于长轴斜率为零的特殊情况,两个端点的纵坐标为 c_y ,横坐标为像素横坐标的极大极小值.

3.4 直线段判定

由于并不是所有的候选区域都对应直线段模型,所以需要判定外接矩形是否对应直线段结构.本文用长轴/短轴判定候选区域是否对应直线段代替文献[10]用 Helmholtz Principle 的判定方法.长短轴之比值大,则区域中像素主要分布在长轴方向,可以认为候选区域对应直线段模型.如果长短轴之比小于设定的阈值(通常取4~7),则认为此区域对应的不是直线段.

4 实验结果及其分析

实验将对比本文算法、传统 Hough 变换、文献[10]算法的检测直线段效果和计算时间.图4所示为一张校园环境图片(550pixels×336 pixels),图片



(a) Region-growing results



(b) The proposed algorithm after 6.18s



(c) Hough transform algorithm after 47.32s

图4 区域增长和直线段检测结果

Fig. 4 Region-growing and line segments detection results

中包含大量的直线段结构。

图4(a)中,通过梯度区域增长的方法得到大量联通的直线段候选区域,在图中由多种颜色表示。这些区域除了对应直线段结构外,还对应着一些非直线段的边缘结构如湖的边缘和树枝等。图中,越是规则的直线段(如教学楼的边缘),其长短轴之比越大,故本文用外接矩形长短轴之比判定直线段可行。图4(b)中,算法剔除图4(a)中长短轴之比较小(小于4)的候选区域和长度较小(小于 $5\% \times$ 图像宽度)的直线段结构,最终检测到如绿色线条所示的直线段结构。可以看出,本文算法不仅能够准确检测明显的直线段结构,也能检测一些并不明显的直线段结构如树干或湖中的边缘结构倒影,说明算法有很强的直线段检测能力。图4(c)显示了传统Hough变换检测结果,该算法检测到的是全局意义上的组成直线的零散边缘像素而不是直线段,还需复杂的后续处理才能得到真正意义上的直线段结构。另外,在2G内存2.67G主频的计算机MATLAB平台上,本文算法执行速度6.18s远优于传统Hough变换47.32s。(备注:Hough变换方法设定的幅值准确度1像素,相位准确度 $\pi/180$)。

图5为车载视觉导航过程中拍摄的图片(640 pixels \times 480 pixels),该图片模糊对比度低,且具有大量的细小边缘结构。在相同梯度模值阈值、方向准确度阈值、直线段长度阈值的情况下,分别由本文算法和文献[10]算法检测直线段。

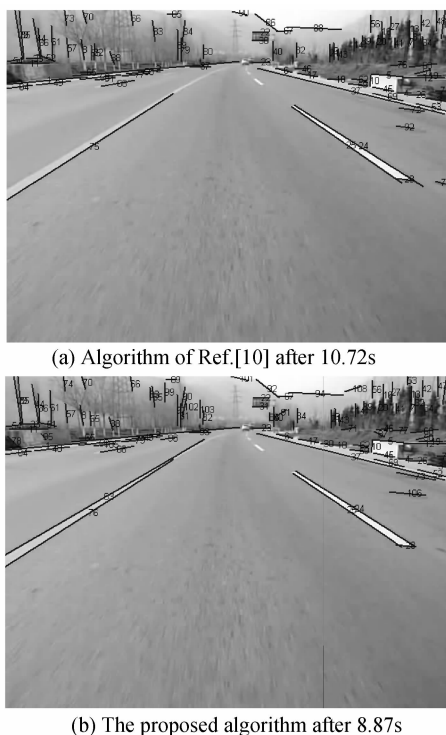


图5 直线段检测结果

Fig.5 Line segments detection results

结合图5对比两种算法的结果:1)计算速度:本文算法计算时间为8.87s,较文献[10]算法计算时间10.72s减少了17.3%。由于本文算法采用了梯度模值伪排序方法代替传统快速排序法,外接矩形长短轴之比代替了Helmholtz Principle判定直线段方法,都节省了巨大的计算量;2)直线段条数:文献[10]算法检测出92条直线段,本文算法检测出108条直线段。文献[10]算法漏检了如图像中左车道线左边缘的长直线段等直线段,因为该算法用了更严格的Helmholtz Principle判定直线段方法。相反,本文用外接矩形长短轴长度之比判定直线段,计算量更小且根据实际需求保留有意义的长直线段;3)直线段准确性:文献[10]算法检测出的直线段23和24超出了图中车道线块范围,而本文算法准确的计算了直线段两端点值。这是由于文献[10]算法将区域形心当作了外接矩形的中心,故该算法计算的两端点值不准确。而本文算法是分别计算像素到短轴最大的距离作为长轴方向上的两个半径,故该结果会更精确。

但是,本文算法少数拟合的直线段并不是真正意义上的直线段结构,如图4中湖的边缘或树枝,造成这一不足的主要原因是梯度区域增长时梯度方向阈值 $2\pi/n$ 过大,在直线段约束中并不能完全消除。如果提高梯度方向的准确度,图片噪音使得本来应连续的候选直线边缘可能被检测为几个区域,这是难以接受的,所以常用的做法是保证直线结构连续的情况下尽量的增大梯度方向阈值。

5 结论

本文提出了一种检测与描述直线段的算法,算法主要通过梯度区域增长方法得到若干直线段候选区域,然后用外接矩形描述并判定候选区域得到直线段结构。通过实验和理论分析表明,本文算法具有以下主要特点:1)算法具有很强的鲁棒性,能够在包含大量噪音的多种场景图片中检测直线段,这主要得益于图像梯度区域增长的方法;2)算法计算量更小,算法采用了梯度模值伪排序方法代替传统快速排序法,外接矩形长短轴之比代替了Helmholtz Principle判定直线段方法,都节省了巨大的计算量;3)算法检测的直线段精确,且提供了候选区域和外接矩形重要信息有利于后续处理;4)算法抵抗细小边缘结构效果明显,这得益于用外接矩形描述并判断直线段候选区域;5)对于不同环境的图片和工程需求,须略微更改算法中相应的阈值:降低方向准确度可使候选区域更连续,增大长短轴之比可得到更为严格的直线段。

参考文献

- [1] WU Jian, LI Sui-lao, QIN Xun-hui. An improved Hough method for vanishing point estimation and its application in road image[C]. IEEE Second International Conference on Future Computer and Communication, Hangzhou China, IEEE press, 2010: 295-298.
- [2] MALLICK S P, AGARWAL S. Structure and view estimation for tomo-graphic reconstruction: a Bayesian approach[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York USA, IEEE press, 2006: 2253-2260.
- [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): 129-137.
- [4] FURUKAWA Y, SHINAGAWA Y. Accurate and robust line segment extraction by analyzing distribution around peaks in Hough space [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2003, **92**(1): 1-25.
- [5] MA Li, MAO Jun-yong. 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.
- [6] DESOLNEUX A, MOISAN L, MOREL J M. Meaningful alignments[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, **40**(1): 7-23.
- [7] DESOLNEUX A, MOISAN L, MOREL J M. Computational gestalts and perception thresholds[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(10): 1129-1140.
- [8] von GIOI R G, JAKUBOWICZ J, RANDALL G. Multisegment detection[C]. IEEE International Conference on Image Processing, San Antonio USA, IEEE press, 2007: 253-256.
- [9] von GIOI R G, RAFAEL, JAKUBOWICZ J. On straight line segment detection[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2008, **32**(3): 313-347.
- [10] von GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M. 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] DESOLNEUX A, MOISAN L, MOREL J M. Edge detection by Helmholtz principle [J]. *Journal of Mathematical Imaging*, 2001, **14**(3): 271-284.
- [12] WU Jian. Vision-based navigation method and its application in vehicle navigation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011: 41-48. 吴剑. 基于视觉的车辆导航参量提取方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2011: 41-48.

A Line Segments Detection Algorithm Based on Grad

QIN Xun-hui, MA Rong, FU Wei-ping, LI Sui-lao

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: An algorithm for line segments detection in digital image was proposed to improve the computation and the robustness of the traditional algorithm. The image gradient is meaningful to detect the edge of structure in the image; therefore its module and direction are computed in the first step. According to the pseudo-sort result of the gradient module, the region-growing method is implemented to enlarge the pixels with the same direction, where the connected pixel region is considered as a candidate region of line segments. Finally, enclosing rectangle is used to describe and judge the candidate region by long axis and short axis of the rectangle, belong which the long axis that meets the requirement is the desired line segment. Based on MATLAB program, an experimental simulation was performed. Experimental results depicted that 108 line segments after 8.87s of computation were detected by the proposed algorithm; which saved 17% of computation time and also detected 16% line segments more than the traditional LSD algorithm. This algorithm can accurately and quickly detect line segments in many complex environments in the image.

Key words: Line segments detection; Image gradient; Region-growing; Enclosing rectangle