

文章编号: 0253-2239(2010)10-2904-08

基于边缘方向图的建筑物直线特征提取

丁伟利¹ 王文锋² 张旭光¹ 苏连成¹

(¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)
(²燕山大学车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 从建筑物图像中提取直线是视觉导航、特征识别和遥感影像处理等很多应用中的关键步骤。针对复杂建筑物图像,提出了一种基于边缘方向图的直线特征提取算法。该算法在 Canny 边缘的基础上,提出边缘方向编码策略,能过检测 9×9 局部窗口内的直线,将边缘拆分成直线、曲线和点的组合,生成了一种新的直线检测辅助图像——边缘方向图,并通过分析边缘方向图中连续线边缘的方向分布,结合直线误差判别准则和稀疏直线拟合识别直线。实验结果表明:该算法的直线检测性能优于 Hough 变换和相位编组等经典方法,对建筑物图像的直线检测准确率高,误判率、漏检率低,算法稳健性强。

关键词 机器视觉;目标识别;直线检测;方向编码;直线度误差

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2904

Extracting Straight Lines from Building Image Based on Edge Orientation Image

Ding Weili¹ Wang Wenfeng² Zhang Xuguang¹ Su Liancheng¹

(¹ Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004 China)
(² Institute of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004 China)

Abstract Detecting lines in a digital image is a crucial step in many applications, such as visual navigation, feature recognition and remote sensing image processing. In this paper, an algorithm which is based on edge orientation image is proposed for extracting straight lines from complex building image. Firstly, edges are detected based on Canny detector. Secondly, an edge direction coding strategy is proposed by detecting the local line in 9×9 window. Thirdly, edges are split into a series of straight lines, curves and points, and a new secondary image — the edge orientation image is generated. Finally, the straight lines are extracted from the edge orientation image by analyzing the direction distribution, and using the straightness errors evaluation strategy and the sparse line fitting algorithm. Experiment results show that the proposed algorithm is better than Hough transform and phase grouping algorithm. It can detect lines correctly in complex building images with high accuracy rate, low false and low missing rate and good robustness.

Key words machine vision; target recognition; line detection; direction code; straightness error

1 引 言

直线提取是计算机视觉的一个基本问题,在视频跟踪^[1]、摄像机标定^[2]、遥感图像处理^[3]、姿态估计^[4]、视觉测量^[5]和目标识别^[6]等很多领域都有应用。建筑物图像中的大量直线,是对建筑物进行识别、定位和三维重建最重要最稳定的特征,直线提取的效果,直接影

响后续处理的准确性。因此检测建筑物中的直线,具有十分重要的意义。

针对建筑物图像中的直线提取问题,人们提出了很多方法,其中最具有代表性的为

1) Hough 变换^[7]及其改进方法^[8];这类方法是应用最为广泛,提出较早的经典方法。其优点是抗

收稿日期: 2010-01-04; 收到修改稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(60905046, 61005034, 60805045)资助项目课题

作者简介: 丁伟利(1979—),女,博士,讲师,主要从事计算机视觉、虚拟现实和红外仿真等方面的研究。

E-mail: weiye51@gmail.com

噪能力强,能够连接共线短直线。但建筑物中直线数目众多,分布密集,应用 Hough 变换法往往会把大量密集的属于不同直线上的点误识别为同一直线上的点,检测效果并不理想;

2)相位编组法:相位编组法是 Brian 等提出的直线检测算法^[9],它充分利用了图像相位携带的大量构成直线的相关像素点的空间信息,能够检测出较低对比度的直线段。但对于建筑物这样复杂的场景,会产生大量的短直线,误检现象也十分严重^[10];

3)链码法:链码是图像边界描述的优良方法,也是直线检测的一种常用方法,早在 19 世纪 70 年代,Freeman 就提出了直线链码的三个准则^[11],为直线检测提供了新的思路,但在建筑物图像上的应用表明,此种方法会存在严重的误检和漏检问题^[12];

4)最小特征根分析法^[13]:最小特征根分析法是近年来提出的一种新的直线检测方法,该算法利用边缘像素的协方差矩阵特征值来判断是否含有直线,在检测建筑物直线特征方面取得了较好的效果,但仍然会产生一些短直线,对噪声也较敏感;

5)主元分析法(PCA)^[14]:主元分析法是近年来提出的另一种效果比较好的直线检测方法,该算法把边缘图像划分为行、列两部分分别进行处理,并利用主元分析法对数据进行降维,进而可以检测建筑物中大量的直线特征,但受阈值选择和噪声的影响较大,算法稳健性不高。

为了准确识别建筑物中的直线,本文提出了一种基于边缘方向图的直线特征提取方法。该方法突破了经典直线检测算法的思路,从边缘拆分这一全新的角度,利用局部直线检测算子对边缘进行方向编码,将边缘图像分割成直线、曲线与点的组合,构成了一种直线检测的辅助图像——边缘方向图。在边缘方向图的基础上,进一步利用方向一致性、直线误差判别准则和稀疏直线拟合方法识别直线特征,有效地解决了建筑物图像中直线检测的漏检、误检和噪声干扰等问题。

2 边缘方向图

利用方向编码检测直线的思想在相位编组法^[9]和链码法^[11]等很多算法中都被应用,但这些算法通常只考虑像素点 8 邻域内的梯度,并不能表达直线在 $0\sim 180^\circ$ 范围内的准确方向,增加了后续直线提取的复杂性和出错概率。建筑物图像中的直线具有连续性、分布密集和噪声干扰多的特点,如果运用 8 邻域方向编码,将难以区分位置关系相近的多条直

线特征。因此必须建立新的方向编码策略。

建筑物图像中,同一直线上各点的方向趋于一致;直线与直线交点处方向变化明显,曲率较大。基于这一特点,设计了一个局部直线检测算子对边缘点进行方向编码,构造边缘方向图的方法,具体过程如下:

以边缘点 $P_j(x_j, y_j)$ 为中心,构造一个 $N\times N$ 的直线方向检测窗口,如果通过点 P_j 的连续线条为直线,则定义此直线与窗口水平方向的夹角为边缘点局部方向,记为 θ ,其取值范围为 $0\sim 180^\circ$;令 P_j 点的像素灰度在数值上等于 θ 取整后的值,所有边缘点依次计算后形成的图像定义为边缘方向图。

2.1 直线方向检测窗口

确定合适的窗口尺寸 N 是计算边缘局部方向的重要步骤,它决定了子线段的长度以及局部方向与实际直线的吻合程度。理论上,如果未知的连续边缘为直线,则以每个边缘为中心,被特定尺寸的窗口切分的子线段 θ 取值应处处相同。但在实际的数字图像中,如果直线的方向不为 $0, 45, 90, 135$,由于离散化的影响, θ 的取值将随方向检测窗口的不同而与真实值产生不同的方向计算偏差。

为确定方向计算偏差与检测窗口大小之间的关系,考察角度范围在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 之间($0\sim 90^\circ$ 相同)的 7 条平面直线在不同窗口作用下的 θ 值,并定义同一窗口对不同直线的方向计算偏差平均值为 θ_{mean} ,最大值为 θ_{max} 。如图 1 所示,设直线 $l_1\sim l_7$ 允许的最大方向检测窗口为 $N\times N$ (图 1 中 $N=35$ pixel),分别取以直线上的像素点为中心的 $N\times N, N/2\times N/2, 9\times 9, 7\times 7, 3\times 3$ 和 2×2 窗口,计算窗口内子线段的角度 θ ,结果如表 1 所示。

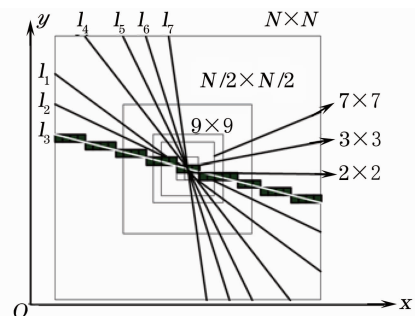


图 1 离散化直线在不同窗口作用下的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of discrete straight line segment operated by different window sizes

由表 1 可知,当窗口尺寸 $r\geq 9$ 时, θ 的计算结果能准确地反映整条直线的方向;反之,则误差过大;但窗口越大,计算量也会相应增加。通过 θ_{mean} 和

θ_{\max} 的值分析可知:选择 9×9 的窗口作为直线方向检测窗口具有合理性。同时, 9×9 窗口切分的子线

段最短长度为 9 pixel, 也符合人眼对子线段的最小识别长度。

表 1 不同窗口下直线方向 θ 的对比

Table 1 Comparison of θ in differend window size

	Size	θ of l_2	θ of l_3	θ of l_4	θ of l_5	θ of l_6	θ of l_7	θ_{mean}	θ_{max}
$N \times N$	165	154	143	128	116	107	98	0	0
$N/2 \times N/2$	164	152	143	127	115	109	100	1.3	2
9×9	162	151	145	128	119	108	103	2.4	5
7×7	157	150	139	131	126	113	98	5	10
3×3	180/146	146	146	135/124	124	135/124	90/124	13	28
2×2	180/135	180/135	180/135	90/135	90/135	90/135	90/135	22.5	38

2.2 局部直线检测及方向编码

检测窗口内的直线识别是进行边缘方向编码的关键。通常,原图像经 Canny 边缘检测后, 9×9 窗口内典型的像素分布情况有 8 种,如图 2 所示。图中中心点表示当前像素,黑色点表示 9×9 窗口内的其他边缘像素。

由图 2 可知,如果 9×9 窗口内过中心的连续线条为直线,则需满足如下条件:1)长度大于 9;2)包含两个以上端点;3)至少有一条可通过当前像素的边缘,且该条边缘两 endpoint 之间满足直线最短原则:即端点间的直线距离 d_{is} 近似等于边缘长度 L ,或直线度因子 $s = d_{is}/L \geq T$, T 为阈值。

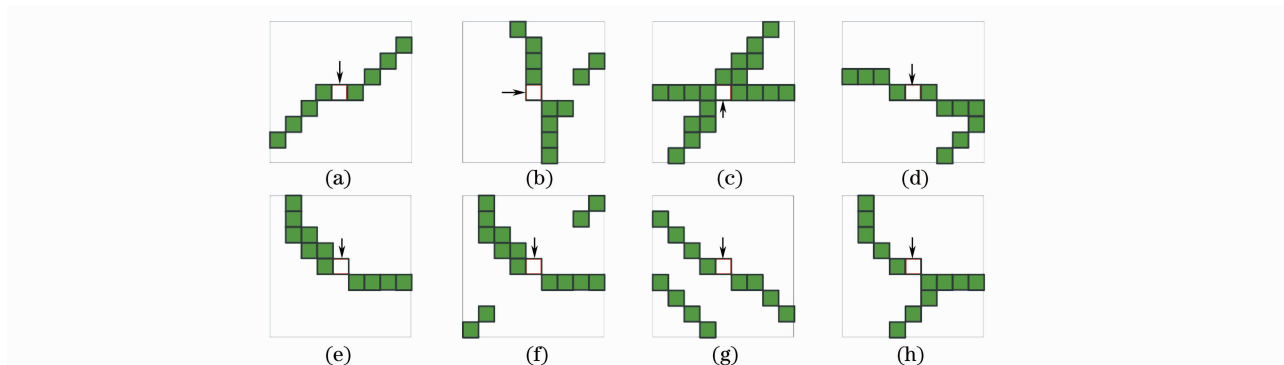


图 2 9×9 窗口内典型像素分布情况

Fig. 2 Typical pixel distributions in 9×9 window

上述三个条件中,第一条保证了直线具有一定的长度,可以过滤较短线段;第二条排除了封闭曲线的影响;第三条保证了窗口区域内直线的存在,可以准确剔除曲率较大的角点。因此,如果窗口区域内的边缘点满足上述三个条件,则中心像素点属于某直线的可能性最大,通过该像素且满足直线最短原

则的边缘也最可能属于某直线。反之,当前像素点则一定不属于某直线,或仅属于某直线的边界(这种情况并不影响对于直线的判断)。

设过中心点 $P_j(x_j, y_j)$ 最长的一条直线在 9×9 窗口内的 endpoint 坐标为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 则 $P_j(x_j, y_j)$ 的局部方向 θ 的计算公式为

$$\theta = \begin{cases} 0, & s < T \\ \arctan \left[\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \right] \times 57.3, & y_2 \geq y_1, s \geq T \\ \arctan \left[\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \right] \times 57.3 + 180. & y_2 < y_1, s \geq T \end{cases} \quad (1)$$

令中心点 $P_j(x_j, y_j)$ 的灰度在数值上等于 θ 取整后的数值,即可完成对当前点的方向编码。

2.3 边缘方向图的形成及其性质

根据边缘方向图的定义,遍历所有边缘点后形

成的图像即为边缘方向图,设为 $D(x, y)$ 。图 3 是几幅典型建筑物图像及其边缘方向图,其中 3(a) 为以直线特征为主的典型建筑物图像;图 3(d) 为含有曲线特征的典型建筑物图像,图 3(b), (e) 为边缘图

像,图 3(c),(f)为生成的边缘方向图。

分析生成的图像,边缘方向图有如下特点:1)每个点的灰度表征了该点的局部方向;2)包含边缘图像中长度大于 9 pixel 的所有直线信息,但缩短了原

有直线的长度;3)实现了边缘图像中复杂连续线条的拆分,滤掉了方向变化较大的点及噪声,形成了易于区分的若干条间断轮廓线。

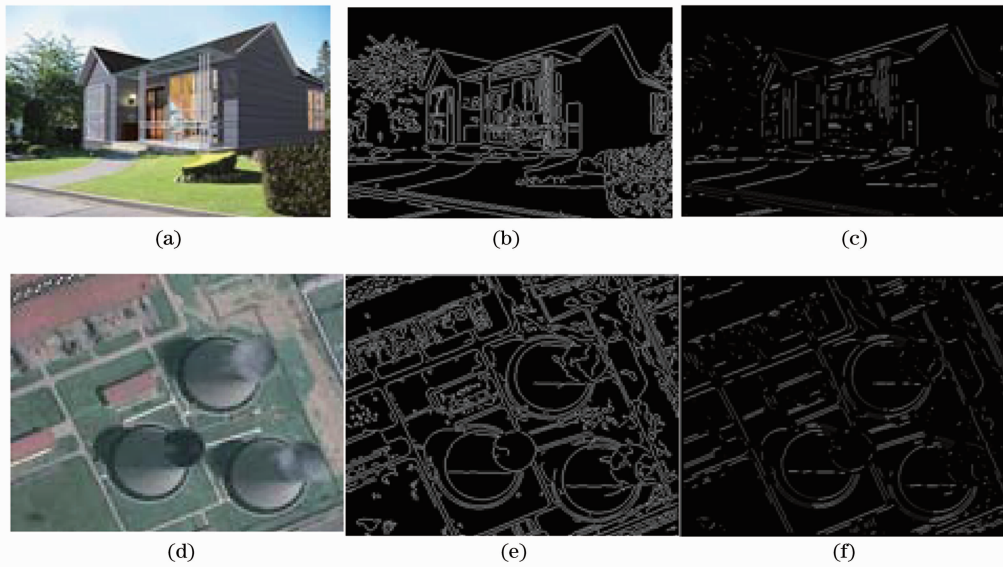


图 3 建筑物边缘方向图

Fig. 3 Edge orientation image of the building

设边缘方向图中有 n_D 条连续线条,则连续线条可分为三类:第一类直线 $L(x,y)$ (m_1 条),第二类平滑曲线 $C(x,y)$ (m_2 条),第三类为数目少于 5 的孤立点 $P(x,y)$ (m_3 个),即

$$\begin{cases} D(x,y) = \sum_{i=1}^{m_1} L_i(x,y) + \sum_{j=1}^{m_2} C_j(x,y) + \sum_{k=1}^{m_3} P_k(x,y) \\ n_D = m_1 + m_2 + m_3 \end{cases} \quad (2)$$

3 建筑物直线提取算法

根据边缘方向图的特点,直线提取的任务就是从(2)式的 $D(x,y)$ 中 n_D 条连续的线条中识别出直线。设某一连续线条为 $T(x,y)$,如果 $T(x,y)$ 是直线,或者是含有部分直线段的曲线,则其直线段部分必满足:1)两点之间直线段距离最短;2)同一直线上各点的方向一致且连续。

根据上述性质,判别某段连续线条是否为直线或是否含有直线,关键在于方向一致性和两端点间距离最短的判别。对于建筑物这种高度复杂的场景来说,边缘噪声广泛存在(如图 4 所示几种情况),再加上量化误差和方向图形成误差的影响,合理的直线判别方法十分关键。

为降低噪声的影响,提高算法稳定性,引入直线度

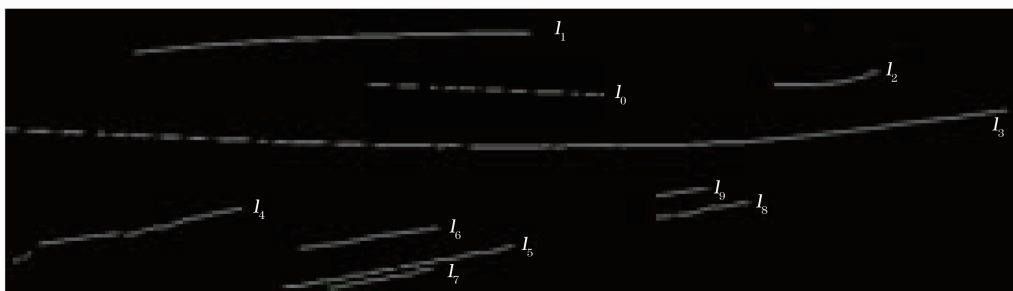


图 4 含有噪声点的边缘方向图

Fig. 4 Edge orientation image with noise

误差判别准则和同方向点稀疏直线拟合算法来识别直线。直线度误差准则的引入可以剔除内部有曲率变化的伪直线;同方向点的稀疏直线拟合算法则可以从含有噪声点以及曲率变化平缓的轮廓线中去识别直线。

3.1 直线度误差判别准则

直线度误差在机械领域中有广泛的应用^[15],它

指的是实际直线对理想直线的变动量。采用两端点连线法来评定直线度误差^[16]。如图 5 所示,设 $T(x,y)$ 中边缘点的个数为 n_T ,两端点的坐标为 (x_1,y_1) 、 (x_2,y_2) ,任意一点坐标为 $p_i(x_i,y_i)$, $i=3,4,\dots,n_T$,以两端点连线 l 作为评定基线,计算 $T(x,y)$ 上任意一点 p_i 到两端点连线的距离 $d(i)$ 为

$$d(i) = \frac{|(y_2 - y_1)(x_i - x_1) + (x_2 - x_1)(y_1 - y_i)|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (3)$$

则该连续线条的直线度误差 f_{BE} 为

$$f_{BE} = d_{\max} - d_{\min} \quad (4)$$

式中 d_{\max} 为 $d(i)$ 中的最大值; d_{\min} 为 $d(i)$ 中最小值。如果 $f_{BE} < T$ (T 为阈值),可判断连续线条 $T(x,y)$ 为直线。



图 5 直线度误差

Fig. 5 Departures of straightness

3.2 同方向点的稀疏直线拟合

直线拟合的方法有利于识别直线,但如果 $T(x,y)$ 上所有点都参与拟合,一旦含有噪声点,将会影响整个拟合结果。为克服噪声影响,设计如下稳健算法拟合直线:

首先定义理想直线的方程为

$$y = kx + b \cdot k, b \in R. \quad (5)$$

设待检测的连续线条 $T(x,y)$ 上点的个数为 n_T ,统计 $T(x,y)$ 上点的方向,边缘方向直方图为 $H_D(d_{ir})$, $d_{ir} = 0, 1^\circ, \dots, 180^\circ$,如果某一方向范围 $a \in [d_{ir} - 3, d_{ir} + 3]$ 出现的次数较多,且包含 m_a ($m_a \geq 10$) 个像素点,对应的位置为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, m_a$,最大外接矩形为 R_a 。

令 $s = m_a/n_T$,则 s 的取值越大,说明连续线条是直线的可能性越大。对属于同一方向 $a \in [d_{ir} - 3, d_{ir} + 3]$ 的所有点应用最小二乘法进行直线拟合,即求解最小化问题:

$$\min \sum_{i=1}^{m_a} [y_i - (k_a x_i + b_a)]^2. \quad (6)$$

求得参数 k_a 和 b_a 后,再分别考虑同方向点的最大外接矩形 R_a 之内和边缘连续线条上的所有

点,计算其到拟合直线的误差值:

$$d_{is-a}(i) = \frac{|k_a x_i - y_i + b_a|}{\sqrt{k_a^2 + 1}}, i = 1, 2, \dots, n_T \quad (7)$$

设最大外接矩形 R_a 内的超过误差允许范围内的连续点的个数为 n_{in-a} ,边缘上超过误差允许范围内的连续点的个数为 n_a ,如果 $n_a^- < T$ (T 为阈值),则 $T(x,y)$ 为直线;如果 $n_a > T$, $n_{in-a} < T$,则 $T(x,y)$ 上含有直线。

3.3 直线提取算法步骤

根据以上判别准则,设计基于边缘方向图的直线提取算法,具体流程如图 6 所示。首先利用 Canny 算子对原始图像提取边缘;然后根据第二部分所述方法生成边缘方向图,并利用 8 连通算法对边缘方向图中的连续像素点进行标号;接下来依次提取标号相同的像素点,统计像素数目 L ,根据 L 的不同以及像素点之间灰度值之差 E_{err} 的不同,分以下三种情况分别提取直线特征:1)如果 $L < 10$,根据方向图形成原理扩展边缘,利用直线度误差判别准则进行直线识别,如果识别结果为直线,则记录直线数量及参数;2)如果 $L \geq 10$, $E_{err} \leq \theta_{\max}$ (θ_{\max} 是 9×9 窗口计算产生的最大偏差,见表 1),直接标记当前标号相同的连续轮廓线为直线并记录直线数量及参数;3)如

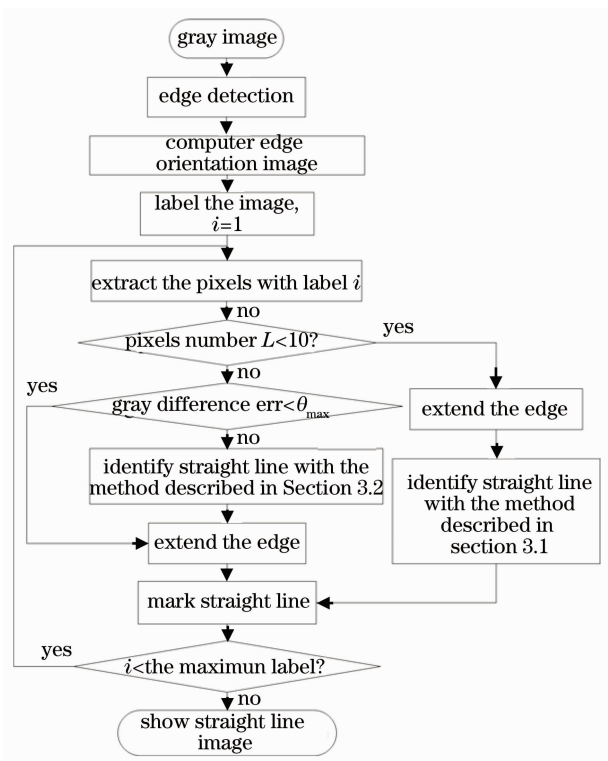


图6 提出的算法直线检测流程图

Fig. 6 Straight line detection flow chart of the proposed method

果 $L \geq 10$, $E_{err} > \theta_{max}$, 则当前标号相同的连续轮廓线可能为含有噪声的直线或曲率变化平缓的曲线,也有可能为含有直线的曲线,此时利用同方向点的稀疏拟合原理进行直线识别。如果识别结果为直线,则记录直线数量,然后扩展边缘并记录直线参数。

最后,统计识别的直线段数量,总数记为 n ,并利用图像的方式显示提取的所有直线段。

4 直线检测结果及性能分析

4.1 检测结果对比

选择标准的建筑物图像作为测试图像,分别用本文算法、Hough 变换(standard Hough transform)和相位编组(Phase grouping)的方法检测直线,结果如图7所示。从结果可以看出,本文方法对建筑物中的直线准确识别率最高。相比而言,相位编组法会把很多非直线段误识为短线段,对于房屋主体部分的直线更是难以准确识别;Hough 变换法把很多不同直线的密集点误识别为一条直线段,对于房屋主体部分的大量直线也会漏检。表2是分别运用三种算法的直线检测结果,从时间上来看,本文算法的运行时间略长于相位编组算法和 Hough 变换算法,但其识别准确率远远高于其他两种算法。

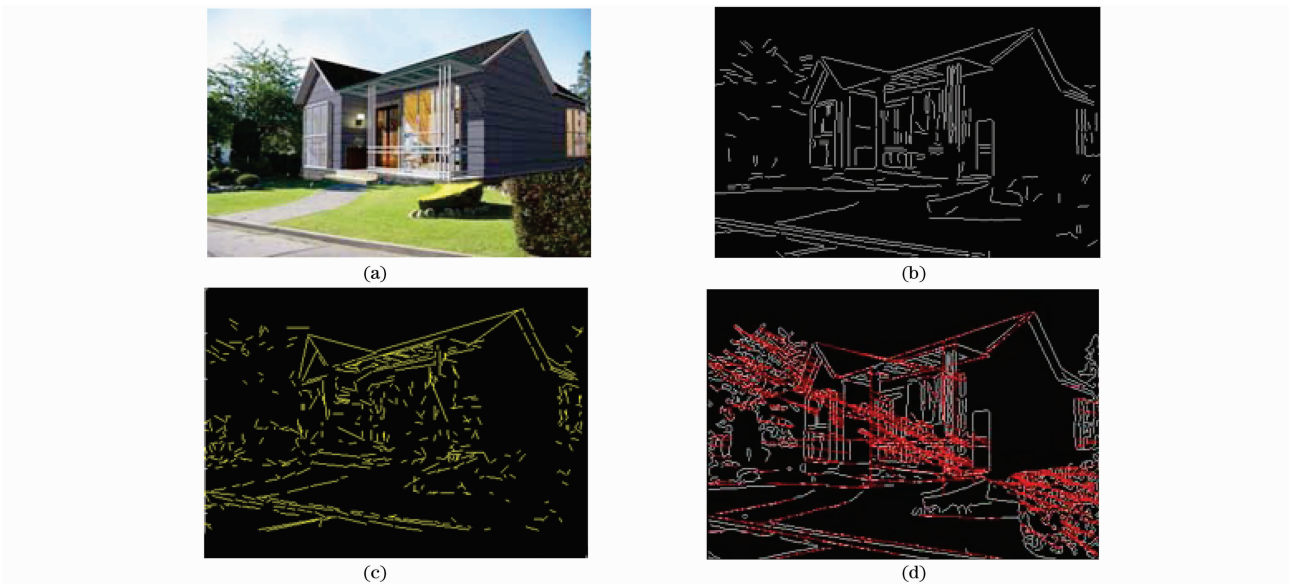


图7 不同算法的直线检测结果。(a)测试图像;(b)本文算法结果;(c)相位编组结果;(d)Hough 变换
Fig. 7 Line detection results with different algorithms. (a) Test image; (b) result of proposed method;
(c) result of phase grouping method; (d) result of standard Hough transform method

4.2 算法性能分析

选择 20 幅典型的建筑物图像,利用本文算法进行直线提取。图8为其中3幅典型图像的原图和直线检测结果。图8(a)为 Google Earth 上截取的航拍图像;图8(b)为复杂建筑物场景图像;图8(c)为

含有云、树木等干扰的建筑物图像;图8(d)~(f)为直线检测结果。从结果可以看出,该算法对于不同的建筑物场景图像均具有较好的识别效果,能够克服树木、云、植被和阴影等不规则形状物体产生的大量噪声干扰,算法稳健性强。

表 2 不同算法的直线检测性能对比

Table 2 Comparison of the line detection performance of different algorithms

	Proposed method	Phase grouping	Standard Hough transform
Detecting numbers	369	369	247
Accurate numbers	337	156	38
Accurate rate / %	91.42	42.27	15.38
Running times / s	2.73851	1.35529s	2.31009

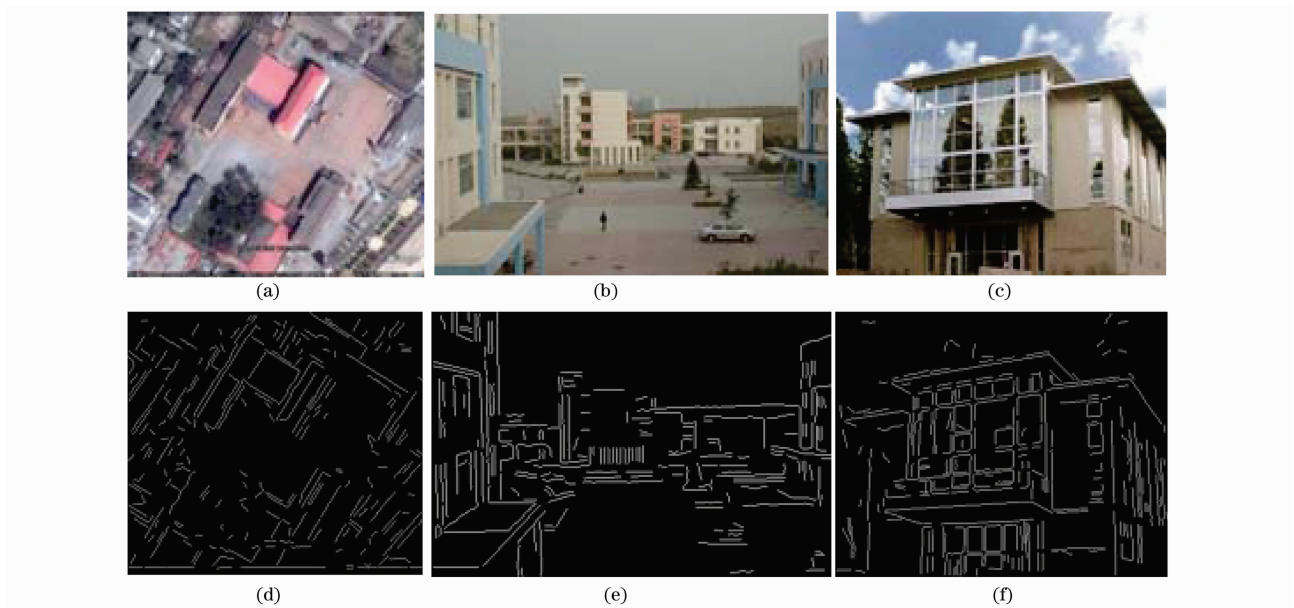


图 8 本文算法对典型建筑物图像的直线提取结果

Fig. 8 Extracting straight lines results for our proposed method

设检测的直线数目为 n ; 检测的直线中实际并不是直线的线段数目为 m ; 从边缘图像中漏检的直线数目为 k 。定义三个性能指标来评价算法效率

1) 误检率(False rate) r_f :

$$r_f = m/n. \quad (8)$$

2) 准确率(Accuracy rate) r_a :

$$r_a = (n - m)/(n - m + k). \quad (9)$$

3) 漏检率(Missing rate) r_m :

$$r_m = k/(n - m + k). \quad (10)$$

表 3 列出了对 20 幅建筑物图像进行直线检测的统计结果, 其中序号为 4, 7, 20 的图像分别对应图 7(a)~(b)表中的直线检测数目 n 由 3.3 节中所述方法确定。根据表 3 的性能分析结果, 计算得出的平均识别准确率为 94.99%, 误判率为 6.77%、漏检率为 5.02%。这一结果完全可以满足对建筑物识别、定位和重建的要求, 具有较高的实用性。

表 3 20 幅建筑物图像的直线检测结果

Table 3 Line detection results for 20 building images

No.	n	r_f	r_m	r_a
1	439	0.0319	0.1146	0.8854
2	361	0.0582	0.0634	0.9366
3	370	0.0946	0.0429	0.9571
4	513	0.0507	0.0356	0.9644
5	272	0.1287	0.0042	0.9958
6	494	0.1417	0.0162	0.9838
7	403	0.0521	0.066	0.934
8	446	0.0942	0.0218	0.9782
9	518	0.0251	0.0381	0.9619
10	739	0.0319	0.1146	0.8854
11	291	0.0528	0.085	0.915
12	332	0.0825	0.0396	0.9604
13	400	0.1024	0.01	0.99
14	410	0.0825	0.0418	0.9582
15	602	0.0244	0.0632	0.9368
16	230	0.0731	0.0228	0.9772
17	527	0.0565	0.0313	0.9688
18	379	0.0152	0.1067	0.8933
19	171	0.095	0.0472	0.9528
20	550	0.0468	0.1141	0.8859

5 结 论

提出了基于边缘方向图的建筑物直线提取方法。该方法有效地利用了直线的性质,生成边缘方向图,巧妙地将复杂的建筑物场景拆分成若干含有方向信息的边缘轮廓,并进一步识别直线。利用该方法提取建筑物中的直线信息,具有简单、准确性高和误识率低的特点,为航空影像、立体视觉和机器人导航中的建筑物特征准确识别和定位提供了基础。当然,该方法也适用于其他情况下的直线检测,但是对于含有大量平滑曲线的图像,会将曲线的一部分误识别为直线,另外,与其他算法相比,虽然本文算法对建筑物等复杂场景的识别准确率大大提高,但算法耗时略长,这也是今后研究中需要改进的地方。

参 考 文 献

- Zhang Jianwei, Zhang Qiheng. Extended object tracking method based on straight-line edge feature matching[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2826~2831
张建伟, 张启衡. 基于直线边缘特征匹配的扩展目标跟踪方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2826~2831
- Wu Qingyang, Li Jingzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
吴庆阳, 李景镇, 苏显渝 等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1224~1227
- Sun Xian Wang, Hongqi, Zhang Zheng *et al.*. Automatic method for urban roads detection and mapping based on remote sensing images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 86~92
孙 显, 王宏琦, 张正 等. 基于遥感图像的城市道路自动测绘方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 86~92
- Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. An extended orthogonal iteration algorithm for pose estimation from point and line segment correspondences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3129~3135
许允喜, 蒋云良, 陈方. 基于点和直线段对应的扩展正交迭代位姿估计算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3129~3135
- Ding Weili, Zhu Feng, Hao Yingming. Three-dimensional information extraction from single architecture image[J]. *Chinese J. Scientific Instrumen*, 2008, **29**(9): 1965~1971
丁伟利, 朱 枫, 郝颖明. 基于单幅建筑物图像的三维信息提取[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(9): 1965~1971
- Wenyu Wu, Dong Yin, Rong Zhang *et al.*. Bridge recognition of median-resolution SAR images using pun histogram entropy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 572~575
- Hough, P. V. C. Method and means for recognizing complex patterns[P] United States Patent 3069654, 1962
- J. Cha, R. H. Cofer, R. H and Kozaitis, Extended hough transform for linear feature detection[J], *Pattern Recognition*, 2006, **39**(6): 1034~1043
- J. B. Brian, A. R. Hanson, E. U. Riseman, Extracting straight lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(4): 425~455
- Yuan Guanglin, Xue Mogen, Li Congli *et al.*. Fast hough transform line detection based on image block according to phase group[J]. *Computer Measurement & Control*, 2005, **13**(7): 647~649
袁广林, 薛模根, 李从利 等. 基于相位编组图像分块的快速 Hough 变换直线检测[J]. *计算机测量与控制*, 2005, **13**(7): 647~649
- H. Freeman, Computer processing of line-drawing Images[J]. *Computing Surveys*, 1974 **6**(1): 57~97
- Pan Dafu, Wang Bo. Line extraction based on edge direction[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(6): 513~516
潘大夫, 汪渤. 基于边缘方向的直线提取算法[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(6): 513~516
- D. S. Guru, B. H. Shekar, P. Nagabhushan. A simple and robust line detection algorithm based on small eigenvalue analysis[J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2004, **25**(1): 1~13
- Y. S. Lee, H. S. Koo, Jeong. A straight line detection using principal component analysis[J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2006, **27**(14): 1744~1754
- 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
- National Standardization Technical Committee. Measurement of Departures from Straightness. GB/T 11336-2004 [S]. Beijing China Standard Press, 2005, People Republic of China
国家标准化技术委员会. 直线度误差检测 GB/T 11336-2004[S]. 北京: 中国标准出版社. 2005