

基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法

徐超*, 平雪良

江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 针对标准 Hough 变换在直线检测中存在的问题, 提出了一种基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法。利用 8 邻域搜索对边缘图像像素点进行了聚类分组; 提出了像素点梯度方向差分概念, 求出每一个边缘分组中相邻像素点的梯度方向差分, 从而进行直线预检测, 排除不含直线特征的边缘组; 基于随机抽样一致性算法, 提出了一种带有直线参数模型预检验的改进随机 Hough 变换算法。研究结果表明, 该算法有效解决了标准 Hough 变换中的问题, 改善了直线检测过程中的误检情况, 具有检测速度快、检测精度高的优点。

关键词 图像处理; 直线检测; 随机 Hough 变换; 梯度方向差分; 随机抽样一致性算法

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051001

Line Detection Algorithm Based on Improved Random Hough Transformation

Xu Chao*, Ping Xueliang

*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology,
School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*

Abstract Aiming at the existing problems in the line detection for standard Hough transform, a line detection algorithm based on improved random Hough transform is proposed. The pixels of edge images are clustered and grouped by 8-neighborhood search. The concept of the pixel gradient direction difference is proposed, and the gradient direction difference between adjacent pixel is calculated in each edge group, thus the line pre-detection is carried out to exclude the edge groups without line features. Based on the theory of the random sample consensus algorithm, the improved random Hough transformation algorithm with a linear parameter pre-test model is proposed. The research results show that the proposed algorithm effectively solves the problem in standard Hough transform and improves the error detection rate in the process of line detection. The proposed algorithm has the advantages of fast detection and high detection accuracy.

Key words image processing; line detection; random Hough transform; gradient direction difference; random sample consensus algorithm

OCIS codes 100.2000; 100.3005; 330.5000; 330.7310

1 引言

随着科技水平的发展与进步, 机器视觉技术在众多领域得到了越来越广泛的应用, 而目标识别是图像处理和计算机视觉的一个重要课题^[1-6], 在目标识别的过程中, 直线检测又是至关重要的一步, 广泛应用于目标追踪、尺寸检测、相机标定等众多领域。

Hough 变换是 Hough^[7]于 1962 年提出的一种

使用表决原理的参数估计技术, 已经成为处理图像中直线检测问题的一种经典算法, 目前绝大多数的直线检测算法都是基于标准 Hough 变换(HT)技术的。Hough 变换对于噪声不敏感, 具有较强的稳健性, 但仍存在计算量大、复杂度、峰值难以确定等问题。基于此, 许多研究人员提出了改进算法, 如 Xu 等^[8]提出随机 Hough 变换(RHT), 利用随机性, 采用一种“多对一”的映射方式, 在一定程度上解

收稿日期: 2018-08-23; 修回日期: 2018-09-10; 录用日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61305016)

* E-mail: 2805791219@qq.com

决了占用内存高、计算量大的问题,但同时由于随机采点,在处理复杂图像时引入大量无效单元,算法效率不高;Matas 等^[9]提出概率 Hough 变换(PPHT)算法,其核心思想是在进行图像像素映射时,将像素点映射到具有更大概率的参数域单元中,从而减少了算法处理时间,但仍存在计算量大,占用内存高且无法确定端点位置的问题;张振杰等^[10]提出基于 Hough 一维变换的直线检测算法,将极坐标参数空间简化为一维空间,在计算复杂度和储存空间方面得到了一定程度的改进;Ji 等^[11]通过放大直线峰值与噪声之间差异,引入局部增强算子,从而得到更加精确的局部累加峰值,但需要对图像进行全局遍历,效率不高;刁燕等^[12]将边界分为有序和无序两类,提出基于概率的局部 Hough 变换优化算法;孙俊峰等^[13]提出结合像素局部对比度和全局虚警抑制的直线检测算法,提高了直线检测的稳健性;张江鑫等^[14]利用梯度信息进行像素点聚类,然后对聚类点进行 RHT 直线检测,减小了参数空间的占用单元,但是会将相互平行的直线上的像素点归为一类,仍存在无效累计的问题。

目前已有的直线检测算法相较于标准 Hough 变换已经有了一定程度的提升,但在均衡性方面还有待提高。基于此,本文提出一种基于改进 RHT 的直线检测算法,处理过程主要包括:基于 8 邻域搜索的边缘图像分组、基于梯度方向差分的直线边缘预检测、基于随机抽样一致性(RANSAC)算法的改进 RHT 直线边缘细分和直线精确处理。

2 标准 Hough 变换存在问题描述

2.1 标准 Hough 变换直线检测算法

标准 Hough 变换本质是一种从图像空间到参数空间的映射关系,如图 1 所示,其中 (ρ, θ) 表示原点到直线距离的向量,该向量与直线垂直, ρ 表示向量长度, θ 表示向量方向;将图像空间中的特征信息映射到参数空间,将参数空间离散化,利用共线点在参数空间相交的对偶性,遍历图像中每一个像素,并映射到参数空间,对参数空间累加“投票”,并通过局部峰值检测出直线参数,映射回图像空间中,即为原图像中直线的检测结果;由于直线的斜率存在无穷大情况,因此 Hough 变换通常在极坐标系下进行。

2.2 标准 Hough 变换直线检测存在的问题

王竞雪等^[15]对于标准 Hough 变换直线检测存在的问题进行了详细描述,将其分为确定性和不确定性问题两类,本文结合实际应用中直线检测

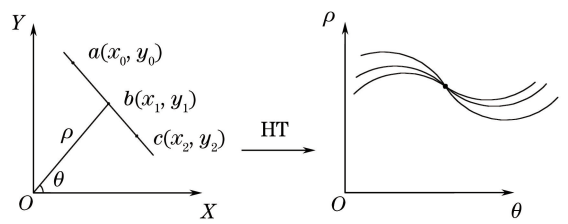


图 1 Hough 变换示意图

Fig. 1 Hough transformation diagram

的需求,将标准 Hough 变换直线检测过程存在的主要问题描述如下。

1) 实时性问题。由于标准 Hough 变换需要遍历图像中的每一个像素,并将其映射到参数空间进行累加投票,因此在处理大尺寸图片时所需要的计算量十分庞大;由 Hough 变换的处理过程可知,其内存消耗与“投票”间隔成反比,对于一幅尺寸为 $948 \text{ pixel} \times 650 \text{ pixel}$ 大小的图片,设置 ρ 的量化宽度为 1, θ 的量化宽度为 0.001° ,硬件平台为 Intel(R)Core(TM)i7-6700、3.40 GHz、8 G,软件平台为 Matlab2014a,采用标准 Hough 变换进行直线检测所需的时间为 57.65 s,不能满足工业生产实时性要求,不具备实用价值。

2) 参数空间的伪峰值问题。由于图像中噪声和小短线的影响,图像空间中可能存在伪峰值点,根据投票阈值的不同,可能出现直线误检现象。

3) 直线过连接问题。标准 Hough 变换直线检测可能将不在同一连通域中的像素点检测为同一直线,或将噪声点与边缘点检测为同一直线。

4) 线段端点定位和长度确定问题。标准 Hough 变换直线检测无法获得线段的端点坐标和长度。

3 基于改进 RHT 的直线检测算法

算法的流程如图 2 所示,主要分为 4 步:1) 8 邻域边缘图像分组可以排除小短线和噪声影响,解决直线检测过程中过连接问题;2) 直线边缘预检测可以排除不含有直线特征的连通域,提高算法的检测效率,解决计算量大、占用内存高的问题;3) 直线边缘细分可以提取出连通域中的直线边缘像素点,解决直线检测过程中线段长度确定问题和伪峰值问题;4) 对直线进行精确处理,得出线段端点坐标并通过最小二乘法计算直线的精确参数,从而进一步解决目前标准 Hough 变换直线检测存在的问题。

3.1 8 邻域边缘分组

8 邻域边缘分组是对边缘图像进行遍历搜索,

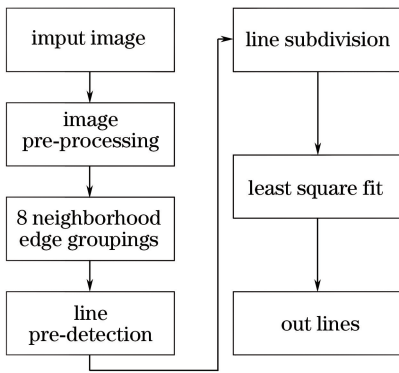


图2 算法检测流程

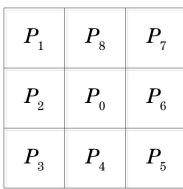
Fig. 2 Flow chart of algorithmic detection

并对连通边缘进行聚类分组,从而将图像分为不同的连通域,在边缘检测的基础上,具体分组过程如下。

1) 图像预处理,生成边缘图像,设定边缘最短像素数阈值 T_{\min} 。

2) 对边缘图像进行全局遍历,判断是否存在未标记的边缘像素点,若存在未标记的边缘像素 P_0 ,则进行新的边界跟踪;否则结束算法,图3所示为 P_0 的8邻域。

3) 对于边缘像素点 P_0 ,按照逆时针方向,即从 P_1 开始到 P_8 结束,判断其8邻域内是否存在其他边缘像素点,若存在,则建立边缘分组 E_n , $n(n=1, 2, 3, \dots)$ 表示边缘分组编号;若不存在,即 $P_1 \sim P_8$ 像素点灰度值均为0,则像素点 P_0 为孤立像素点,结束当前边界追踪,并返回步骤1),同时将像素点 P_0 置零。

图3 P_0 的8邻域Fig. 3 8 neighborhoods of P_0

4) 将8邻域内的边缘像素点加入到当前边缘分组中,并将像素点 P_0 置零。

5) 将步骤4)中边缘分组的最后一个像素点作为当前点继续搜索,判断其8邻域内是否存在其他边缘像素点,若存在,则返回步骤4);若不存在,则按照顺时针方向依次选取步骤4)中像素点 P_0 的8邻域内检测到的边缘像素点作为当前点,直到 P_0 的8邻域内的像素点全部检测结束。

6) 重复步骤2)~5),直到整个图像遍历结束。

7) 判断每一个边缘分组像素数目是否大于阈值 T_{\min} ,如果不满足,则为小短线或者噪声,将该边缘分组去除,不参与后续处理,从而排除小短线和噪声的影响。

3.2 基于梯度方向差分的直线边缘预检测

在8邻域边缘分组的基础上,对分组后的像素点进行基于梯度方向差分的直线边缘预检测。

图像上某点的梯度向量表示为

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x(x, y) \\ G_y(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 (x, y) 表示像素点的坐标, $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别表示像素点在 x 和 y 方向上的梯度。梯度方向为像素点 (x, y) 灰度增长最快的方向,定义为

$$\alpha(x, y) = \arctan \left[\frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right], \alpha(x, y) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]. \quad (2)$$

像素点的梯度方向垂直于该点的边缘方向,因此直线上像素点的梯度方向大致相同,利用梯度方向信息可以进行直线定位,排除非直线边缘;但在实际应用时,由于梯度方向精度不高,往往需要设定误差 θ_r ,对 $(\theta \pm \theta_r)$ 范围内的边缘点进行累加,则同一直线上像素点梯度方向差值最大可以达到 $2\theta_r$,难以保证检测精度。基于此,本文提出梯度方向差分概念,对于任意边缘组 $E\{x_i, y_i\} (i=1, 2, 3, \dots, m)$,其中 i 表示某一边缘分组中像素点的编号, m 为边缘分组中最大像素数目;相邻两像素点的梯度方向差分 $\Delta\alpha$ 定义为

$$\Delta\alpha_i = \alpha(x_{i+1}, y_{i+1}) - \alpha(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, m - 1. \quad (3)$$

设定差分阈值 T_a ,依次求出每一边缘组 E_n , n 表示边缘分组的编号,将相邻两像素点的梯度方向差分,建立投票空间,判断梯度方向差分是否满足阈值要求并进行累加投票,并根据投票结果排除不含有直线特征的边缘组,从而解决直线检测过程中非直线边缘造成的无效累加问题。

设定梯度方向差分阈值为 T_a ,累加阈值为 T_{\max} ,直线边缘预检测的过程如下:

1) 初始化累加器次数 $N_{E_n} = 0$ 。

2) 对边缘分组后的图像,计算边缘分组 E_n 中相邻像素点梯度方向差分 $\Delta\alpha_i$;这里将梯度方向转

化到无符号区域,即

$$\alpha(x, y) = \begin{cases} \alpha(x, y) + \pi, & \alpha(x, y) < 0 \\ \alpha(x, y), & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

3) 判断 $\Delta\alpha_i < T_a, i=1, 2, \dots, m-1$, 若成立, 则对应累加器 $N_{E_n} = N_{E_n} + 1$ 。

4) 判断每一边缘分组累加器 $N_{E_n} \geq T_{\max}$, 若成立, 则该边缘分组存在直线; 反之, 则该边缘分组不含有直线特征, 将边缘分组中像素点置零, 不参与后

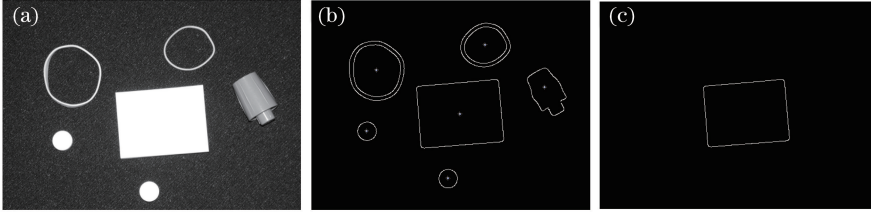


图4 基于梯度方向差分的直线边缘预检测。(a)实验图像;(b)8邻域边缘分组情况;(c)含有直线特征的边缘

Fig. 4 Linear edge detection based on gradient direction difference. (a) Experimental image; (b) 8 neighborhood edge group; (c) edges profile with straight line feature

3.3 基于改进 RHT 算法的直线边缘细分

图像中直线包含两种情况:1) 理想的独立直线边缘;2) 包含直线特征的闭合边缘。对于包含直线特征的边缘,需要进一步细分,将边缘分组中的直线特征提取出来。文献[6]提出的 RHT 算法通过预先假定直线参数,实现直线像素点的聚类,但由于随机取点具有盲目性会造成无效累计,因此需要更有针对性地采点,从而建立大概率直线参数模型,避免非直线模型造成的投票无效累计问题。RANSAC 算法^[16]假设将样本数据分为“内点”、“外点”和“噪声点”,“内点”为满足给定数学模型的正确数据,“噪声点”和“外点”均为不符合给定数学模型的数据,其计算过程的实质是模型的假设与验证的过程。基于 RANSAC 算法思想,在 RHT 随机采点建立直线参数模型时,首先进行参数判断,不符合要求的模型不参与后续累加,从而在一定程度上避免 RHT 随机性问题。

本文算法将 RHT 算法中抽取 2 个点改为选取 4 个样本像素点,其中 2 个样本点作为假设“内点”,建立目标数学模型,另外 2 个假设“内点”建立验证模型,具体步骤如下:

1) 从直线边缘预处理后的图像中随机抽取 4 个假设“内点”, $p(x_k, y_k), k=a, b, c, d$ 。根据其中两个“内点” $p(x_a, y_a), p(x_b, y_b)$ 建立直线参数方程 1, 得到直线的参数 (ρ, θ) 。

2) 根据另外两个“内点” $p(x_c, y_c), p(x_d, y_d)$ 建立直线参数方程 2, 得到直线的参数 (ρ^*, θ^*) ,

续处理。

设定累加阈值 $T_{\max} = 80$, 梯度方向差分阈值 $T_a = 0.08$, 对于图 4(a) 所示图像, 进行 8 邻域边缘分组和直线边缘预检测得到处理后的结果如图 4(b) 和(c) 所示。

由图 4(c) 可知, 处理后的图像有效地排除了非直线边缘, 提取出含有直线特征的边缘组。

$$\begin{cases} |\rho - \rho^*| \leq \delta_1 \\ |\theta - \theta^*| \leq \delta_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中 δ_1 和 δ_2 是参数误差, 若 4 点在同一直线上, 则理论上 $\delta_1 = \delta_2 = 0$, 但由于图像由离散的像素点组成, 存在误差, 故设定 $\delta_1 = \delta_2 = 0.5$, 判断(5)式是否成立, 若成立, 则认为 4 个“内点”满足参数方程 1, 该参数方程有效, 对应的直线可能在图像上; 反之, 则说明参数无效, 返回步骤 1)。

3) 求出边缘组中其他样本点到直线参数模型的距离, 即

$$d_{i-ab} = |\rho - x_i \cos \theta - y_i \sin \theta|, i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

4) 若 d_{i-ab} 满足小于点到直线距离阈值 δ , 则说明该像素点是“内点”, 在直线上; 反之, 则说明该点不在直线上。

5) 统计该模型累加的“内点”数目, 若数量满足最短直线像素数目, 则模型成立, 直线存在。

通过直线边缘细分可以有效地实现直线上像素点的聚类, 为后续直线参数精确处理和端点定位提供基础。

3.4 直线的精确处理

直线精确处理的目的是为了获取直线的端点坐标、长度以及直线方程的精确参数。直线边缘细分后的点集中各像素点的坐标为 $(x_i, y_i), i=1, 2, 3, \dots, p$, p 表示每一直线聚类后像素点的数目, 当直线参数 $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ 时, 将像素点根据 X 坐标从小到大进行排序, 反之, 则根据 Y 坐标进行从小到大

大排序,即可得到线段的端点坐标及长度。同时,将最小二乘算法应用到直线拟合中,从而得出直线的精确参数。对直线细分后的点集进行最小二乘算法拟合。为简化计算过程,这里直接采用直角坐标下的直线方程,进行拟合优化。优化的模型为

$$\min \phi = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 x_i - b_0)^2, \quad (7)$$

式中 a_0 和 b_0 表示直线的参数,函数 $\phi = f(a_0, b_0)$ 对 a_0 和 b_0 求偏导数,经整理可得:

$$\begin{cases} a_0 = (n \times \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i) / \\ [n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] \\ b_0 = n \times \sum_{i=1}^n y_i - n \times a_0 \times \sum_{i=1}^n x_i \end{cases} \quad (8)$$

由于在直角坐标系下直线方程存在直线斜率无穷大的情况,因此在最小二乘拟合之前,首先判断下式是否成立:

$$[n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] = 0. \quad (9)$$

若(9)式成立,则直线方程为 $x = N$, N 为常数,满足:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (10)$$

否则,根据(8)式得出直线参数。

通过直线精确处理,即可得出图像中线段的端

点坐标和长度以及所在直线的精确参数,具有一定的实际应用价值。

4 实验结果与分析

为验证改进算法在检测直线时的稳定性和适应性,分别对仿真图像、近景楼房图像、道路图像等数字图像进行直线提取,并与标准 Hough 变换进行对比分析,其中算法处理时间是指图像经边缘检测后至线段提取完成所需要的处理时间,实验平台为 Matlab R2014a。标准 Hough 变换直线检测算法采用 Matlab 中自带函数。

实验 1。图 4(a)为含有高斯噪声的仿真图像,大小为 $512 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$,内部含有 4 条明显的直线特征,标准 Hough 变换和本文算法检测后的结果如图 5 所示。标准 Hough 变换的相关参数设置如下: ρ 的量化间隔为 1, θ 的量化间隔 0.01° ,参数投票的累加阈值 $T = 0.1n_{\max}$ 。本文算法相关参数设置如下:最短边缘像素阈值 $T_{\min} = 20$,梯度方向差分阈值 $T_a = 0.08$,梯度方向差分累加阈值 $T_{\max} = 60$,点到直线距离阈值 $\delta = \sqrt{2}$ 。

由实验结果可以看出,对于干扰较小,直线特征明显的仿真数字图像,本文算法和标准 Hough 变换直线检测算法均能有效地提取出图像中的直线特征,但在处理时间和算法效率方面,本文算法所需要的处理时间约为标准 Hough 变换的 $1/3$,并且可以有效地提取出线段的端点坐标和长度。

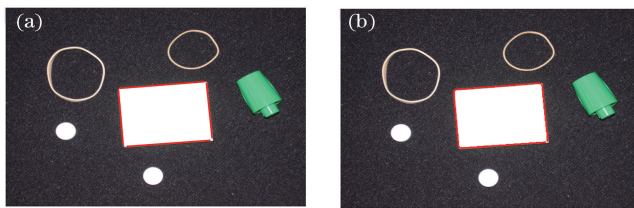


图 5 实验图像直线边缘检测。(a)标准 Hough 变换;(b)本文算法

Fig. 5 Linear edge detection of experimental image. (a) Standard Hough transform; (b) proposed algorithm

实验 2。图 6(a)是一幅含有较多直线特征的建筑物数字图像,大小为 $532 \text{ pixel} \times 572 \text{ pixel}$,通过标准 Hough 和本文算法检测后的结果如图 6(b)和 (c)所示,标准 Hough 变换的相关参数设置如下: ρ 的量化间隔为 1, θ 的量化间隔 0.01° ,参数投票的累加阈值 $T = 0.1n_{\max}$ 。本文算法相关参数设置如下:最短边缘像素阈值 $T_{\min} = 25$,梯度方向差分阈值 $T_a = 0.08$,梯度方向差分累加阈值 $T_{\max} = 80$,点到直线距离阈值 $\delta = \sqrt{2}$ 。由于楼房图像中直线特征较多,求取线段的长度和端点坐标无实际意义,因此,

并未进行线段端点坐标和长度的计算。

由实验结果可知,建筑物数字图像由于植物干扰,采用标准 Hough 变换进行直线检测在干扰部分产生大量错检,存在直线过连接现象,而本文算法可以很好地排除噪声干扰,有效地检测出图像中的直线特征,并且直线的连贯性较好。

实验 3。汽车进行自主导航时常需要视觉进行道路识别以规划行驶路径,图 7(a)是两边带有植物干扰的道路图片,大小为 $983 \text{ pixel} \times 604 \text{ pixel}$,通过标准 Hough 和本文算法检测后的结果如图 7(b)和

(c)所示。标准 Hough 变换的相关参数设置如下： ρ 的量化间隔为 1, θ 的量化间隔 0.01° , 参数投票的累加阈值 $T = 0.3n_{\max}$ 。本文算法相关参数设置如下：最短边缘像素阈值 $T_{\min} = 60$, 梯度方向差分阈值

$T_a = 0.08$, 梯度方向差分累加阈值 $T_{\max} = 100$, 点到直线距离阈值 $\delta = \sqrt{2}$ 。由于求取道路图像中线段的长度和端点坐标无实际意义, 因此, 并未进行线段端点坐标和长度的计算。

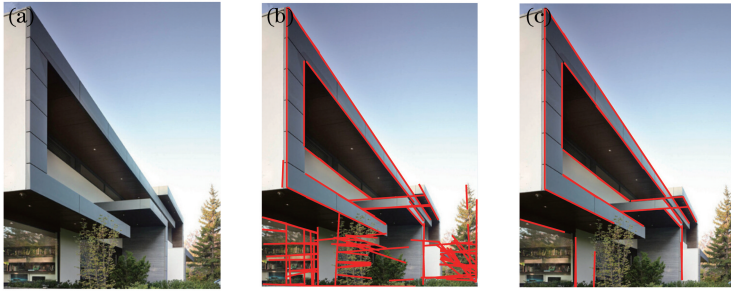


图 6 建筑物图像直线边缘检测。(a)楼房图像;(b)标准 Hough 变换;(c)本文算法

Fig. 6 Linear edge detection of building image. (a) Building image; (b) standard Hough transform; (c) proposed algorithm

由实验结果可知, 当标准 Hough 变换对道路图像进行直线检测时, 由于道路两旁植物噪声干扰, 未能很好地检测出道路边缘, 而本文算法可以排除两

旁噪声干扰, 准确地识别出道路边缘信息, 具有更好的实际应用价值。

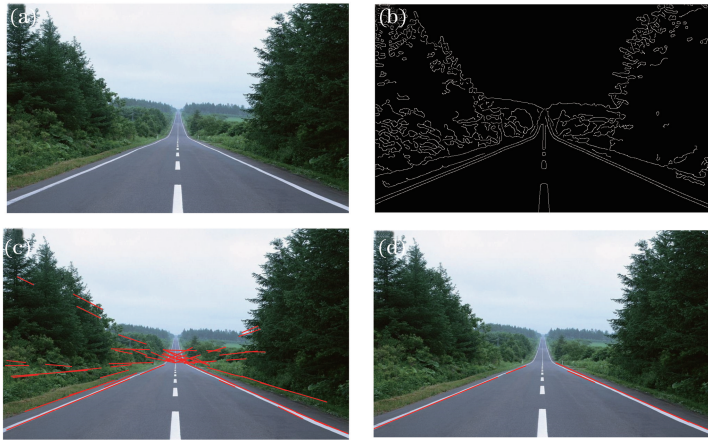


图 7 基于梯度方向差分的直线边缘预检测。(a)道路图像;(b)边缘检测图像;(c)标准 Hough 变换;(d)本文算法

Fig. 7 Linear edge detection based on gradient direction difference. (a) Road image; (b) edge detecting image;

(c) standard Hough transform; (d) proposed algorithm

三组对比实验的统计结果如表 1 所示。

表 1 算法处理时间对比

Table 1 Algorithm processing time contrast

Test	Size / (pixel× pixel)	Time /s	
		Standard Hough transform	Proposed algorithm
Test 1	512×384	0.968	0.389
Test 2	532×572	2.225	1.153
Test 3	983×604	3.943	1.075

实验 1 中本文算法检测出的端点坐标及线段长度, 如表 2 所示。

除以上三组对比实验外, 本文还针对多个场景进行了直线检测, 考虑篇幅有限, 不一一列出。实验结果表明, 本文算法能够有效地提取出不同种类数

字图像中的直线特征, 与标准 Hough 变换相比, 具有更好的抗干扰能力, 直线连贯性好, 计算速度快, 很大程度上解决了标准 Hough 实时性问题, 为目标跟踪、尺寸检测、车辆导航等应用领域提供基础。

表 2 端点坐标及线段长度

Table 2 End point coordinates and line segment length

Line	Endpoint /pixel		Length /pixel
Line 1	(193,158)	(338,143)	145.77
Line 2	(343,147)	(352,255)	108.37
Line 3	(351,257)	(206,269)	145.50
Line 4	(203,268)	(192,161)	107.56

5 结 论

提出了一种基于改进 RHT 的直线检测算法,

通过 8 邻域追踪边缘分组,解决标准 Hough 变换直线检测中的过连接问题,提出像素点梯度方向差分概念,很大程度上避免了直线检测过程中无效累计问题,并基于 RANSAC 算法,提出带有直线参数模型预检验的改进 RHT 直线检测算法,进一步解决了无效累计问题,同时提高了算法检测效率,解决了标准 Hough 变换的实时性问题。

通过三组对比实验可知,本文算法在实时性和检测效果方面均优于标准 Hough 直线检测算法,且算法的均衡性更好,解决了目前标准 Hough 变换算法存在的实际问题,直线特征检测效果更加优越,从而可以更好地应用于实际生产中,具有一定的工程实际意义。

参 考 文 献

- [1] Nie H T, Long K H, Ma J, *et al.* Fast object recognition under multiple varying background using improved SIFT method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2349-2356.

聂海涛, 龙科慧, 马军, 等. 采用改进尺度不变特征变换在多变背景下实现快速目标识别[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2349-2356.

- [2] Ulrich M, Wiedemann C, Steger C. Combiningscale- and similarity-based aspect graphs for fast 3D object recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 1902-1914.

- [3] Piella G, Heijmans H J A M. Adaptive lifting schemes with perfect reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(7): 1620-1630.

- [4] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021011.

化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021011.

- [5] Wang L, Liu Q. A multi-object image segmentation algorithm based on local features [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061002.

王琳, 刘强. 基于局部特征的多目标图像分割算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061002.

- [6] Wang W X, Fu Y T, Dong F, *et al.* Infrared ship target detection method based on deep convolution neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712006.

王文秀, 傅雨田, 董峰, 等. 基于深度卷积神经网络的红外船只目标检测方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0712006.

- [7] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns: US3069654[P]. 1962-12-18.

- [8] Xu L, Oja E, Kultanen P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338.

- [9] 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.

- [10] 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.

- [11] Ji J H, Chen G D, Sun L N. A novel Hough transform method for line detection by enhancing accumulator array [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(11): 1503-1510.

- [12] Diao Y, Wu C K, Luo H, *et al.* A line detection optimization algorithm based on improved probabilistic Hough transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815016.

刁燕, 吴晨柯, 罗华, 等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815016.

- [13] Sun J F, Ding S W, Zhang X H, *et al.* Linear feature detection algorithm combined with pixel local contrast [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(6): 31-38.

孙俊锋, 丁少闻, 张小虎, 等. 结合像素局部对比度的直线特征检测算法[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(6): 31-38.

- [14] Zhang J X, Shen X L, Wang H, *et al.* Fast multi-line detection algorithm using randomized Hough transform [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2013, 41(3): 346-350.

张江鑫, 沈小兰, 王辉, 等. 快速随机 Hough 变换多直线检测算法[J]. *浙江工业大学学报*, 2013, 41(3): 346-350.

- [15] Wang J X, Zhu Q, Wang W X, *et al.* Straight line extraction algorithm by Hough transform combining edge grouping [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(2): 378-389.

王竞雪, 朱庆, 王伟玺, 等. 结合边缘编组的 Hough

- 变换直线提取[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 378-389.
- [16] Zhen Y, Liu X J, Wang M Z. An improved RANSAC of fundamental matrix estimation method [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014, 4: 39-43.
- 甄艳, 刘学军, 王美珍. 一种改进 RANSAC 的基础矩阵估计方法[J]. 测绘通报, 2014, 4: 39-43.