

基于空间矩的随机 Hough 变换检测直线

王春芳

(燕山大学 里仁学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为解决随机 Hough 变换中无效采样和累积问题, 研究了一种基于空间矩的随机 Hough 变换直线检测方法; 利用空间矩方法进行随机采样并求出参数空间点, 将计算参数空间点的随机采样点减少到一个, 最后利用随机 Hough 变换原理来确定真实直线; 实验结果表明, 基于空间矩的随机 Hough 变换直线检测方法相对于传统的随机 Hough 变换具有更好的准确性、鲁棒性和稳定性, 实时性得到了较大的提高。

关键词: 直线检测; 随机 Hough 变换; 空间矩; 无效采样; 参数空间

Straight Line Detection via Randomized Hough Transform
Based on Spatial Moment

Wang Chunfang

(LiRen College of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the problem of inefficient sampling and accumulation, line detection via Randomized Hough Transform based on spatial moment was proposed in this paper. Using spatial moment method edge points are randomly sampled and the linear parameters are computed. After Random sampling points was reduced to a point, a real line is determined using random Hough transform. The experimental results show that the proposed algorithm has better accuracy, robustness and stability compared with conventional RHT, and real-time performance can be improved.

Keywords: line detection; random Hough transform; spatial moment; inefficient sampling; parameter space

0 引言

直线检测是数字图像处理中的一个重要步骤, 它在医学图像分析和机器视觉等领域内有着广泛的应用^[1-2]。Hough 变换是检测直线的一种有效工具, 具有很好的准确性和鲁棒性, 但是 Hough 变换存在着参数空间内存需求大、计算复杂和难以找到局部最大值的缺陷^[3]。

针对这些问题, Xu 等^[3]提出了随机 Hough 变换 (RHT), 通过对边缘像素点的随机采样确定参数空间, 采用参数空间多对一映射和动态链表, 减少了计算量和内存空间的需求, 具有参数精度任意高参数空间无限大的优点, 但是大量随机采样和累积问题严重影响了 RHT 的性能。袁卫鹏等^[4]将模糊理论应用到随机 Hough 变换中, 利用模糊理论将参数空间分割为模糊单元, 有效地解决了无效采样和累积问题, 但检测速度较差。段汝娇等^[5]提出了一种基于改进 Hough 变换的直线快速检测算法, 该算法利用相邻像素点的聚类和 Hough 变换原理来检测直线, 具有对应的参数目标性强和阈值无需选取很大值的优点。Shen 等^[6]则提出了基于边缘梯度方向的随机 Hough 变换, 该方法利用边缘的梯度方向确定一条线的主要方向, 随机 Hough 变换施加约束, 大大减少了在随机抽样过程中无效样本数, 但此方法仅适用于梯度方向集中的图像。Kapruziak M^[7]研究了一种最小化内存空间的随机 Hough 变换, 它建立了一个线列表来代

替参数空间, 直线从列表中可以随机选择进行配对, 进一步形成一个较长的线, 虽然该方法提高了算法的性能, 但是过于依赖线配对的过程。崔彦平等^[8]则将空间矩法和 Hough 变换结合起来, 利用空间矩法进行亚像素定位, 再用 Hough 变换提取边缘点, 最后用最小二乘法拟合直线, 虽然该方法能够实现直线亚像素提取, 但是实时性较差。本文利用空间矩算子, 提出了一种基于空间矩的随机 Hough 变换直线检测方法 (SRHT), 来解决无效采样和累积问题, 并且提高了实时性。

1 空间矩算子

空间矩算子建立了理想的连续二维边缘灰度模型, 计算二阶空间矩并利用其函数关系得到边缘参数, 利用 4 个参数求取亚像素边缘点的坐标。空间矩算子具有检测精度高, 计算过程简单和受噪声影响小的优点。

在单位圆上定义一个连续二维理想的边缘模型, 如图 1 所示。连续二维灰度函数 $f(x, y)$ 的空间矩为:

$$M_{pq} = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

由文献 [9] 可知, 理想边缘模型的参数为:

$$\theta = \arctan \frac{M_{01}}{M_{10}} \quad (2)$$

$$l = \frac{4M'_{20} - M'_{00}}{3M'_{10}} \quad (3)$$

式中, M'_{pq} 为旋转边缘模型 θ 角后, 理想边缘垂直于水平方向的二阶空间矩。根据边缘模型, 亚像素边缘检测公式为

$$\begin{cases} x_l = x + \frac{N}{2} l \cos \theta \\ y_l = y + \frac{N}{2} l \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-05-15。

基金项目: 秦皇岛市科学技术与研究发展计划项目 (2012021A057)。

作者简介: 王春芳 (1983-), 男, 河北沧州人, 硕士, 实验师, 主要从事机器人视觉伺服和计算机视觉方向的研究。

式中, (x_i, y_i) 和 (x, y) 分别为边缘点的亚像素坐标和图像坐标, N 代表矩模板的维数。

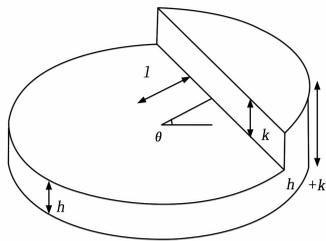


图1 边缘模型

2 改进的随机 Hough 变换

尽管 RHT 采用多对一映射, 即由 n 个边缘点来确定参数空间的参数单元集, 采用动态链表结构仅对映射所得的参数空间的分配单元进行累加, 但是由于 RHT 过于依赖边缘点集的随机采样来确定参数空间的点, 且对其中的无效采样也进行累积计算, 这样不仅引入了大量的无效采样和无效累积, 而且会降低参数空间搜索的效率。针对这一缺点, 提出了改进的随机 Hough 变换方法, 利用空间矩法来求取参数空间点, 分别选用仿真图像和实际图像对算法进行测试。

2.1 基于空间矩的参数空间点确定

在图像空间中分别建立图像坐标系 oxy 和局部坐标系 $o'x'y'$, 如图 2 所示。局部坐标系以随机采样的边缘点 (u, v) 为原点, 两个坐标系的 x 轴和 y 轴平行且指向相同, 则两个坐标系的关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式 (2) 和式 (3) 可以计算出局部坐标系中的边缘参数 l' 和 θ' 。因此, 根据式 (4) 可以求得图像空间中直线 L 上的任意一点在图像坐标系的亚像素坐标 (x_i, y_i) 和局部坐标系的亚像素坐标 (x'_i, y'_i) 。

所以, 图像坐标系和局部坐标系中的直线 L 可分别表示为:

$$l = x_i \cos\theta + y_i \sin\theta \quad (6)$$

$$l' = x'_i \cos\theta' + y'_i \sin\theta' \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (5), 得:

$$l' + u \cos\theta + v \sin\theta = x_i \cos\theta + y_i \sin\theta \quad (8)$$

由式 (6) 和式 (8) 可得:

$$\begin{cases} l = l' + u \cos\theta + v \sin\theta \\ \theta = \theta' \end{cases} \quad (9)$$

根据空间矩算法, 当图像边缘为理想边缘模型时, 式 (9) 即为直线 L 在图像坐标系中的方程, 但是在现实情况下, 图像边缘一般不是理想阶跃模型, 图像中都具有复杂的背景且存在噪声, 这时边缘参数 l 和 θ 的计算则存在原理误差, 需要边缘参数进行误差补偿, 这样就增加了算法的复杂度。因此, 本文将式 (9) 的结果作为随机采样的一个边缘点确定的参数空间点, 利用随机 Hough 变换的原理对参数空间点的分配单元进行累积, 从而判断是否为真实直线。

2.2 改进的随机 Hough 变换流程

首先采用 Canny 算子进行边缘检测。Canny 算子被称为最佳边缘检测算子, 由于它先进行高斯平滑滤波再计算梯度幅

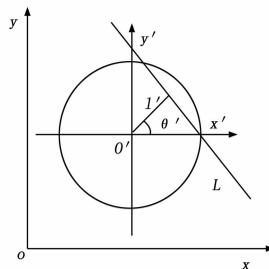


图2 图像空间中的图像坐标系与局部坐标系

值, 具有信噪比高和检测精度高的优点, 用于提取边缘和抑制噪声, 简单有效, 因此应用广泛^[10]。

基于空间矩的 RHT 实现步骤总结如下:

- 1) 用 Canny 检测图像, 取得图像的边缘; 将图像空间的边缘点坐标 $d_i(x_i, y_i)$ 全部存入边缘点集 D 中。建立参数单元集 P , 并初始化, 令 $P = NULL, k = 0$;
- 2) 随机选取 D 中的一个边缘点 d_1 , 计算其二阶空间矩, 并利用空间矩算子来确定一个参数空间点 $p = (\rho, \theta)$;
- 3) 设置一个容忍度 δ , 并在数据集 P 中寻找一个元素 p_c , 若 $\|p_c - p\| < \delta$, 则转到第 5) 步, 否则转到 4);
- 4) 在 p 上附加一个累加单元, 其计数值 $score$ 为 1, 然后将 p 作为一个新的元素插入到 P 中;
- 5) 设置一个阈值 $n_i (n_i = 2, 3, \text{甚至更大})$, 将 p_c 累加单元的 $score$ 值加 1, 若 $score_{p_c} < n_i$, 则转到 6), 否则转到 7);
- 6) 令 $k = k + 1$; 设定检测一条直线所允许的随机采样最大点数 k_{max} , 如果 $k > k_{max}$, 则结束; 否则, 转到 2);
- 7) 将 p_c 作为候选曲线的参数, 并将 D 中所有落在此曲线上的点删除。如果落到该曲线的坐标点数 $m_{p_c} > m_{min}$, 则转到 8), 否则, 该曲线为虚假曲线, 将这 m_{p_c} 个像素点返回到 D 中, 并将 p_c 及其累加单元从 P 中删除, 然后转到 2);
- 8) 一条参数为 p_c 的直线被提取出来, 重置 $P = NULL$ 和 $k = 0$, 转到 2), 继续检测。

上述算法实现的流程如图 3 所示。

综上所述, 本文方法中图像空间的点同累加器变为了一对一映射, 即使对于复杂的图像, 随机采样的次数仍为边缘点的个数, 而不会与 RHT 一样, 当边缘点集增大时, 无效采样呈几何级数增加。虽然计算空间矩在一定的程度上增加了计算量, 但是由于采样数目的大幅度减少, 也省去了不在同一实际直线上的点所占用的参数空间, 而且空间矩算法具有检测精度高, 计算过程相对简单和抗噪性好的优点, 最大限度地降低了噪声对直线参数的影响, 也大大减少了无效采样和无效累积; 另一方面, 在计算参数空间点 (l, θ) 时, 利用了图像空间中的亚像素坐标信息, 提高了参数空间点的计算精度, 从而直线检测的准确性也得到了提高。

3 实验结果分析

为了测试基于空间矩的随机 Hough 变换算法的准确性和鲁棒性, 本文分别选用仿真图像和实际图像对算法进行测试。

首先利用计算机生成一幅 100×100 的图像, 如图 4 (a) 所示。图中共有 6 条直线, 直线参数 θ 分别包括 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 90° 。在理想和加入白噪声的两种情况下, 分别用 RHT 法和 SRHT 法对其进行直线检测, 提取两个三角形的六条边,

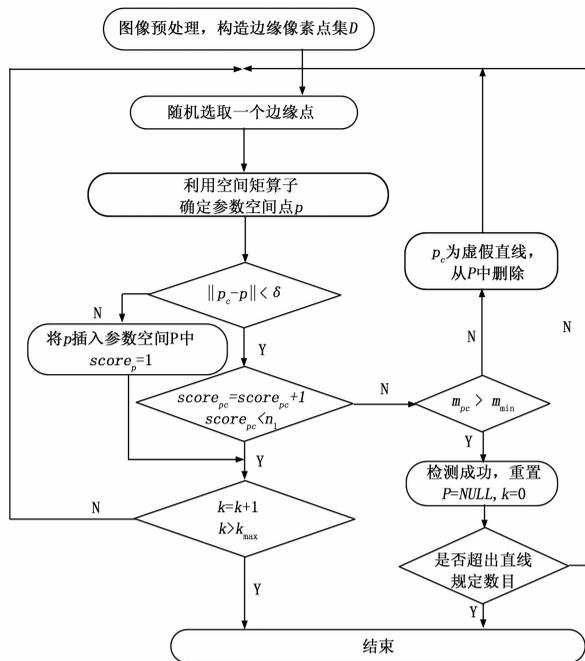


图 3 改进的随机 Hough 变换流程图

表 1 RHT 和 SRHT 检测方法的直线参数

真实值	RHT	SRHT	白噪声	
			RHT	SRHT
(10.5, 90°)	(10, 90°)	(10.5, 90°)	(10.89, 5°)	(10.2, 90°)
(10.5, 0°)	(10.5, 0°)	(10.5, 0°)	(10.5, 1°)	(10.3, 0.5°)
(70.71, 45°)	(71, 45.5°)	(70.5, 45°)	(70.45, 5°)	(70.5, 45°)
(20.5, 90°)	(20.5, 90°)	(20.5, 90°)	(21.3, 90°)	(20.5, 90.5°)
(19.5, 0°)	(19.5, 0°)	(19.5, 0°)	(18.6, 0.5°)	(19.8, 0°)
(51.96, 30°)	(51.5, 29.5°)	(52, 30°)	(50.66, 31°)	(52, 29.5°)
误差	(0.21, 0.17°)	(0.04, 0°)	(0.7, 0.5°)	(0.17, 0.25°)

检测结果如图 4 所示。表 1 为两条方法进行直线检测的所得直线参数。由表中可以看出，在理想情况下，RHT 算法的检测结果中直线参数有误差的为 3 条，平均误差为 (0.21, 0.17°)，检测时间为而本文算法误差为 (0.04, 0°)。在加入白噪声的情况下，由于受到噪声的影响，检测误差增大，检测结果可以看出，在噪声情况下，SRHT 法检测出的直线仍然很完整、清晰、平滑，受到噪声的干扰较小，如图 4 (d) 所示。而 RHT 算法虽然将直线完全检测出来，但是其中一条斜边出现了断点，而且直线不够平滑，去除噪声的效果也不够理想，如图 4 (c) 所示。所以，本文方法相对于传统的 RHT 法具有更好的准确性、抗噪性和稳定性。

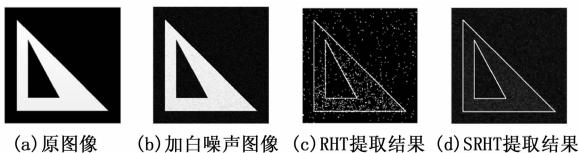


图 4 仿真图像实验结果图

为了进一步测试本文算法的性能，本文分别用 RHT 和 SRHT 对摄像机拍摄的真实图像进行直线检测并对比。测试图像为一幅实验室图像，如图 5 (a) 所示。图 5 (b)、图 5

(c) 和图 5 (d) 分别为 Canny 算子边缘检测、RHT 算法和 SRHT 算法检测结果。

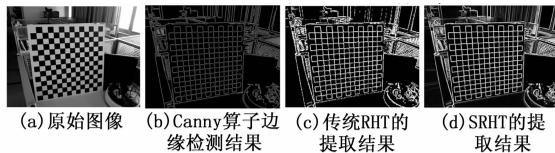


图 5 实际图像实验结果图

由实验结果可以看出，图 5 (c) 中图像的很多细节直线并没有检测出来，很多直线不连续，检测出的直线整体上不够完整清晰，细节上不光滑，检测时间为 15.2 s，时间较长。而图 5 (d) 中实验室图像中的直线基本上被检测出来，周围的边缘直线无缺失，断裂的直线也很少，直线的细节完整、清晰、连续，且保持了较高的定位精度，检测效果显著，SRHT 算法检测时间为 3.6 s，是传统 RHT 算法的 4 倍。这是由于利用空间矩法对计算参数空间点，每次仅需要随机选取一个边缘点，不仅仅有利于去除噪声，而且大大降低了无效采样和无效累积的计算量。因此，基于 SRHT 算法相对于 RHT 算法无论检测精度和检测时间都具有明显的优势。

4 结束语

本文利用空间矩和随机 Hough 变换的原理，研究了一种基于空间矩的随机 Hough 变换直线检测方法，得出了改进的随机 Hough 变换算法流程，并且分别对仿真图像和实际图像上进行了检测实验。实验证明本文算法有效地解决了无效采样和累积问题，能准确地检测图像中的直线，稳定性和鲁棒性强，且运算速度有较大的提高。今后我们将在亚像素级直线检测、高的直线检测率等方面做进一步研究。

参考文献：

- [1] 张萍, 徐毓, 张楠, 等. 基于 Hough 变换的航迹关联算法 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 98-99.
- [2] 杨喜宁, 段建民, 高德芝, 等. 基于改进 Hough 变换的车道线检测技术 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (2): 292-298.
- [3] Kultanen P, Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT) [A]. 10th International Conference on Pattern Recognition [C]. 1990: 631-635.
- [4] 袁卫鹏, 施鹏飞. 模糊随机 Hough 变换算法 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (12): 1825-1828.
- [5] 段汝娇, 赵伟, 黄松岭, 等. 一种基于改进 Hough 变换的直线快速检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (12): 2774-2779.
- [6] Shen X L, Zhang J X, Yu S F, et al. An improved sampling strategy for randomized hough transform based line detection [A]. 2012 International Conference on Systems and Informatics [C], 2012: 1874-1877.
- [7] Kapruziak M. Randomized Hough transform with minimal memory requirements [A]. 2012 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP) [C], 2012: 185-188.
- [8] 崔彦平, 葛杏卫. 基于空间矩的视觉图像基元特征提取方法研究 [J]. 光电子·激光, 2010, 21 (10): 1565-1569.
- [9] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989: 1293-1309.
- [10] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital image processing using matlab [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.