

## 采用拟梯度方向信息的随机 Hough 变换直线检测\*)

张大朴 李玉山 刘 洋 李黎明

(西安电子科技大学电路 CAD 研究所 西安 710071)

**摘 要** 针对随机 Hough 变换(RHT)中的无效采样和累积问题,以边缘点的梯度方向信息为基础,提出了利用边缘的拟梯度方向代替边缘点作为待测空间的直线检测方法。理论分析和实验表明,与传统 RHT 相比,本算法具有检测速度更快、精度更好等优点。

**关键词** 随机 Hough 变换,梯度方向,量化,直线检测

## Randomized Hough Transform with Imitative Gradient Direction

ZHANG Da-Pu LI Yu-Shan LIU Yang LI Chun-Ming

(The Institute of Electronic CAD, Xidian Univ., Xi'an 710071)

**Abstract** To solve the problem of inefficient sampling and accumulation in RHT, the concept of imitative gradient direction (IGD) is proposed based on the gradient direction information of image edge. With the using of IGD, the detection speed is increased and precision is improved.

**Keywords** Randomized hough transform, Quantization, Gradient direction, Line detection

## 1 引言

作为一种有效的直线检测方法,Hough<sup>[1,3]</sup>变换具有对随机噪声和部分遮盖现象不敏感、适用于并行处理等优点,因此被广泛地应用于计算机视觉和模式识别等领域。同时传统 Hough 变换检测直线也存在许多缺陷:(1)需要参数空间,且计算精度与空间大小成正比,计算量大;(2)“一对多”的关系造成参数空间所需的存储量大;(3)单纯的参数空间没有图像特征点的信息,认为参数空间的峰值对应图像空间的直线,伪峰容易导致误检测等等。

针对 Hough 变换的上述问题,在相关文献中提出了各种改进算法。Kiryati 等人提出了概率 Hough 变换(PHT)<sup>[2]</sup>。PHT 认为图像平面的每一由  $n$  个特征点组成的子集被映射到参数空间的一个节点,即“多对一”映射。这种方法能将图像数据映射到参数空间中具有更大概率的单元而不是所有可能的单元。Xu 等<sup>[4]</sup>提出了随机 Hough 变换(RHT),也采用了 PHT 的“多到一”映射的概念。RHT 采用多到一的映射,避免了传统 Hough 变换一到多映射的庞大计算量,而且 RHT 算法采用动态链表结构,只对多到一映射所得到的参数分配单元进行累积,降低了内存需求,同时使得 RHT 具有参数空间无限大、参数精度任意高等特点。然而在处理复杂图像时,由于随机采样会引入大量的无效采样和累积,使算法的性能大为降低。Cheng<sup>[5]</sup>提出了一种利用梯度方向和边缘信息相结合的随机 Hough 变换法,在边缘点集中随机抽取两个点,根据两点的梯度方向来判断两点位于同一直线上概率的大小,减少了无效累积。但此时梯度方向阈值的选取将直接决定该算法的速度以及精度。

边缘检测算法中,一般利用梯度强度来对边缘进行判断。梯度强度发生突变的地方一般认为就是边缘,同时发生突变的方向就是梯度的方向。具体到直线来说,如果直线不平行,

则其梯度的方向也是不同的。根据这一原理,本文提出了一种改进的随机 Hough 变换算法,在边缘检测的基础上,利用边缘的拟梯度方向信息对直线进行检测,有效解决了原算法的无效采样和累积问题,特别在处理比较复杂的图像时有效地提高了运算速度。

## 2 Hough 变换原理

## 2.1 随机 Hough(RHT)

直线参数方程可以表示为

$$\rho = x * \cos\theta + y * \sin\theta \quad (1)$$

其中  $(x, y)$  为图像空间坐标,  $(\rho, \theta)$  为参数空间坐标,  $\theta$  是  $x$  轴到直线的法线的逆时针转角,  $\rho$  是坐标原点到直线的代数距离。对于任意给定的两个点,根据上述参数方程可以求得由这两点所确定直线的参数。

RHT 理论认为,参数空间的一个点可以唯一地被图像空间中的 2 个或者  $n$  个点确定。RHT 随机地从图像中选  $n$  个点,并将它们映射为参数空间的一个点,图像中的点投票到可能性最大的待检测曲线,而不是投票到所有可能的待检测曲线。RHT 采用多到一的映射,避免了传统 Hough 变换一到多映射的庞大计算量,而且 RHT 算法采用动态链表结构。与标准 HT 相比,RHT 具有存储空间小、速度快、参数空间解析度高的优点。

RHT 是通过迭代获取参数空间的全局域值进行的,参数空间的全局峰值点对应着图像空间的一条待检测曲线。在检测出一条曲线后,可以在图像空间中将该曲线删除,然后利用剩余的像素点继续进行 RHT。算法可简述为:(1)将图像的全部边界点生成一个点集  $D$ ,并初始化参数空间。(2)从点集  $D$  中随机地选出一个点对  $(d_i, d_j)$ 。(3)如果这个点对不满足事先确定的距离条件,则返回。(4)利用直线方程求解点对  $(d_i, d_j)$ ,得到  $(\rho, \theta)$ 。如果参数空间中已有这个点(或有与其

\*)基金项目:国家自然科学基金(No. 60172004);博士点基金项目(20010701003)。

相近的点),其累加值加一,否则将 $(\rho, \theta)$ 插入参数空间。(5)累加值在参数空间投票,如果累加值 $f(\rho, \theta)$ 达到阈值,则 $\rho$ 和 $\theta$ 即对应为检测出的直线,将 $D$ 中相应的点清除,初始化参数空间,返回(2);否则返回(2)。

虽然 RHT 只对“多到一”映射所得到的参数分配单元进行累积,但在处理过程中将会出现大量的无效采样和累积的问题,如图 1 所示。

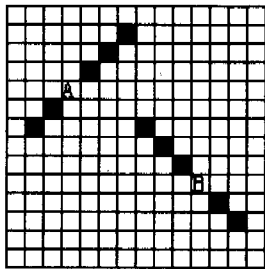


图 1 理想情况下的直线

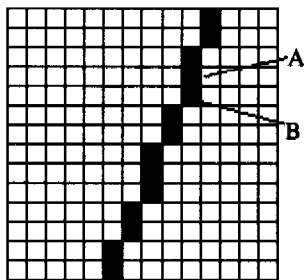


图 2 同一直线上点的梯度方向不同

图中 A 点和 B 点分别位于两条理想情况下的直线上,但由于采样的随机性, RHT 可能会选取这两点,导致需要计算经过这两点的直线参数,并搜索参数单元集,如果其中没有这一参数,还需在参数空间中插入新的单元。

综上所述, RHT 存在如下弊端:(1)过大的边界点集会导致采样的数目增加,从而无效采样以几何级数增加,(2)对于每一对无效采样也要进行累积计算,不但占用了更多的内存,而且会进一步加大参数空间搜索的工作量,使算法的效率大大降低。这一问题在复杂图像的情况下显得更加突出。针对这些问题,本文提出了一种利用边缘的拟梯度方向信息作为待测边缘点集的方法。

## 2.2 基于拟梯度方向的 RHT

梯度的方向包含了边缘的形状信息。在理想情况下,同一直线段上除去端点之外各点的梯度方向是相同的,从而利用梯度的方向可以方便对直线进行定位。但在实际情况下,由于图像是由离散的像素点所组成,对某一条直线来说,利用方向导数的边缘检测算子获得的边缘梯度方向有可能是不同的,如图 2 所示,点 A 和点 B 位于同一直线上,但其梯度方向是不同的。根据这一现象,我们利用梯度方向的原理提出了拟梯度方向的概念。

图像处理过程中一般使用差分来代替方向导数,并利用两个垂直方向偏导数的比值来确定梯度的方向。对于一条直线上的点来说,直接使用梯度方向将会导致一些问题。以 sobel 算子为例,设 $(i, j)$ 为一边缘点,则 $a$ 和 $b$ 中的梯度方向值相等,如图 3 所示。这时仅仅凭梯度方向并不能判断出点 $(i, j)$ 属于垂直方向还是水平方向上。

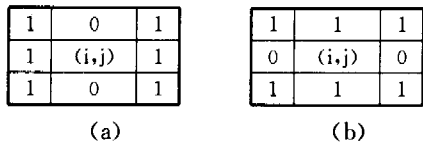


图 3 仅有梯度方向无法判断直线

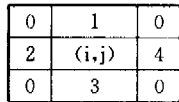


图 4 梯度方向计算模板

我们设计了一种 $3 \times 3$ 的各向异性模板,如图 4 所示。事实上这一模板并不是用来计算梯度的方向,而是将梯度方向的可能值进行量化,所以我们称为拟梯度方向。对于边缘点来说,这样最多会有 12 个量化值,如果对边缘检测后的点集进行处理,最多会将这些点集分解成 12 个子集。与原来的边缘点集相比,同一子集中的点具有相同的拟梯度方向,此时任意选取两点组成图像上真实直线的概率会大大增加。

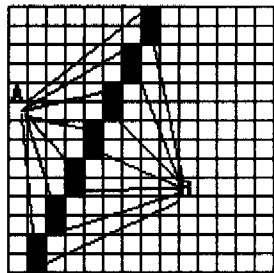


图 5 同一直线上梯度方向不同

采用这一方法会引起一个问题,即同一直线的参数有可能会映射到参数空间的两个或多个单元中去。图 5 中对于黑色所代表直线, A 所代表点的梯度方向值相等,但其与 B 所代表点的梯度方向不同,这就会造成参数空间中可能出现 $\theta$ 值相同而 $\rho$ 值相差不大的两个参数单元,这在一定程度上增加了参数空间所占用的内存,但更多的情况下本方法省去了那些不在同一实际直线上的点对所占用的参数空间。另一方面,由于直线上点数量的减少会降低累积计算时的计算量,从而提高了计算速度。为了避免上述将同一直线误检测为两条直线的情况发生,我们设计了如下算子来确定最终直线的参数:

$$\begin{cases} \theta = \theta_n \\ \rho = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i * d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $d$ 为每个参数单元的累计数。假设检测到了 $n$ 个 $\theta$ 值相同而 $\rho$ 值相差不大的直线段,且直线段的两个端点的坐标相近,这时我们认为它们是同一直线。根据直线的性质,一般情况下这个 $n$ 值是很小的。

在实际图像中的一条边缘直线上,仍可能会存在一些噪声点,由式(2)可知,只要选取合适的 $d$ 值,在噪声点比较小的情况下可以完全避免噪声的影响,在噪声点较多的情况下,也会最大限度地降低噪声对直线参数的影响。所以与经典 RHT 相比,本算法还具有较高的抗噪声性能。

算法的具体步骤如下:

- (1)将图所示模板加于二值边缘图像,得到准梯度方向边缘点集  $D$ 。
- (2)从  $D$  中随机选取具有相同值的点对  $(d_i, d_j)$ 。
- (3)求解点对  $(d_i, d_j)$  得到的点  $(\rho, \theta)$ , 如果参数空间中已有相同点, 其累加值加一, 否则将  $(\rho, \theta)$  插入参数空间。
- (4)在参数空间投票, 如果累加值  $f(\rho, \theta)$  达到阈值, 则认为  $\rho$  和  $\theta$  对应为检测出的直线, 并将  $D$  中相应的点清除。
- (5)如果直线数目达到要求或者点集  $D$  中没有待选点对, 则到(6)否则, 返回(2)。
- (6)判断端点, 利用式(2)求出最终结果。

### 3 理论分析与实验

设图像中有  $K$  条直线, 其长度分别为  $L_i (i \in 1, K)$ , 边缘点集为  $D_1 = \sum_{i=1}^K L_i$ , 利用 IGD-RHT 对边缘进行梯度方向量化后得到边缘点子集, 每个子集近似为  $D_2 = D_1/12$ 。传统 RHT 采样到直线  $L_i$  上任意两点的概率为  $P_1 = L_i * (L_i - 1) / (D_1 * (D_1 - 1))$ 。由 2.2 节可知, 在 IGD-RHT 中有可能将直线

$L_i$  分解到  $n$  个不同的边缘点子集中, 同一子集中直线  $L_i$  的长度就会变为原来的  $1/n$ , 所以利用 IGD-RHT 采样到直线  $L_i$  上任意两点的概率为  $P_2 = L_i * (L_i/n - 1) / (n * D_2 * (D_2 - 1))$ 。由于  $n$  值较小, 可以看出  $P_2 > P_1$ , 这就大大降低了无效采样的概率。同时与传统 RHT 相比, 可将阈值设为原来的  $1/n$ , 计算累积值所用时间也将为原来的  $1/n$ 。

为了检验 AFHT 算法的性能, 采用实际图像对两种算法进行对比, 图像大小为  $256 \times 256$ , 其中图 6(a) 和图 6(b) 分别为原图以及采用 canny 边缘检测后的结果; 图 6(c) 和图 6(d) 分别为采用传统 RHT 算法和本文算法的检测结果。由于 RHT 采样的随机性, 每次检测结果可能会有细微的偏差。对于传统 RHT, 设参数空间累积点数超过 10 即认为该条直线存在; 相同情况下, 采用本算法将阈值设为 5 即可达到几乎相同的结果。作为对比, 还列出了阈值为 10 时采用 IGD-RHT 的结果。由实验结果可以看出, 对于图 6 使用本算法将直线检测的速度提高了将近 5 倍。

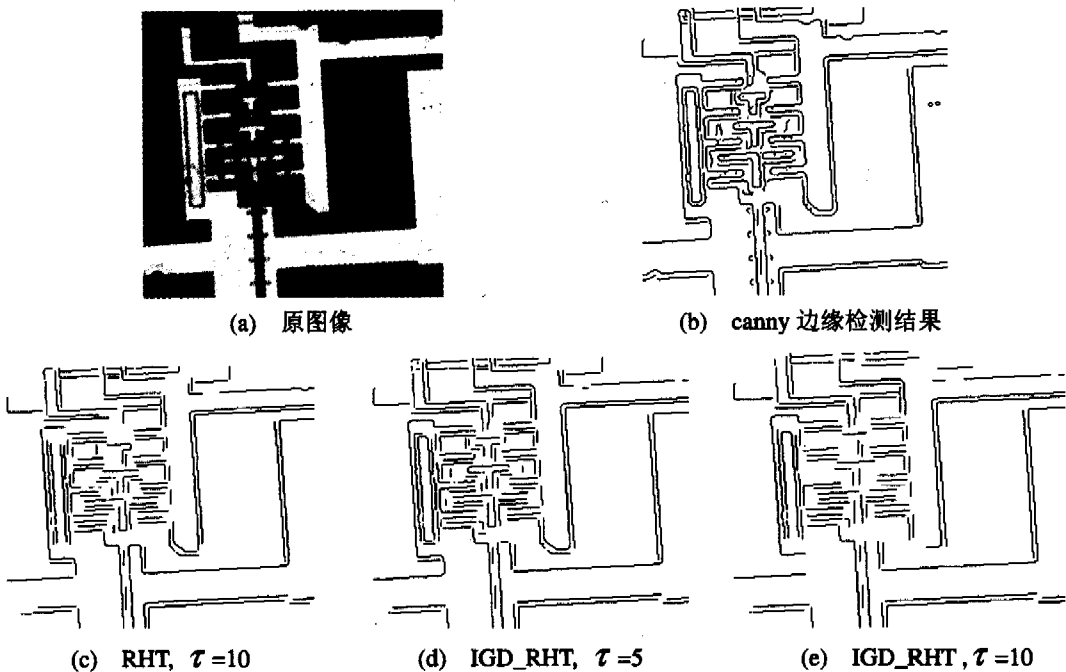


图 6 实际图像实验结果

表 1 两种算法的结果比较

| 算法      | 计算时间 | 直线数目 | 最大采样空间 | 参数空间阈值 $\tau$ |
|---------|------|------|--------|---------------|
| RHT     | 657s | 87   | 3761   | 10            |
| IGD-RHT | 140s | 105  | 410    | 5             |
| IGD-RHT | 167s | 52   | 410    | 10            |

**结束语** 本文在随机 Hough 变换的基础上通过利用边缘二值图像的梯度方向信息, 提出了一种改进的 RHT 算法—IGD-RHT。本算法以边缘点的拟梯度方向为待测点集, 减少了随机采样的空间, 从而大大降低了无效采样和累积的概率。同时利用直线段的端点信息, 即使对短直线也能较精确地检测。实验证明, 与 RHT 相比本算法的运算速度和直线检测的精度都有很大提高, 为基于直线检测的中高级视觉

问题提供了良好的预处理手段。

### 参考文献

- 1 Hough P V C. A method and means for recognizing complex patterns. US Patent 3,069,654. 1962
- 2 Kiryati N, Eldar Y, Bruckstein A M. A probabilistic Hough transform. Pattern Recognition, 1991, 24(4): 303~316
- 3 Jenq J F, Sahni S. Reconfigurable algorithms for the Hough Transform. In: Proc. 1991 International Conference on Parallel Processing, Boca Raton, FL, 1991. 34~41
- 4 Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities. CVGIP - Image Understanding, 1993, 57(2): 131~154
- 5 Cheng Y X, Qi F H. Randomized Hough transform using gradient direction information. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 1998, 17(5): 375~379