

“投票”概率变换在纹理背景中实现 水下目标检测的研究*

袁易全 王明敏

(东南大学无线电工程系, 南京 210018)

摘 要 针对水下激光目标成像时图像对比度低、噪声高等问题, 采用并改进了“投票”概率变换, 导入边缘方向信息和边缘连续性信息, 提出两种抗噪声的“投票”概率变换算法。通过实验检测水下模拟水雷目标, 证明这一方法比传统算法有更好的效果。

关键词 “投票”概率变换, 水下激光成像, 目标检测。

1 引 言

“投票”概率变换是一种能够在图像中检出已知形状的曲线的技术^[1]。由于这一技术具有对局部的曲线缺失及噪声干扰等不敏感的优点, 所以广泛应用于目标检测领域。此方法一般是在边缘检测得到边缘图像的基础上进行的。在自然环境中, 目标所处背景十分复杂, 水下激光成像系统得到的图像往往会产生大量无效边缘点, 对检测造成干扰。1998 年, 美国 Jet and Percusson 实验室(JPL)为军方所研制的弹药自动识别系统中, 就使用了“投票”概率变换来对武器试验场中未爆炸的 BLU-97 型弹药进行识别和自动清除, 获得较好的效果。另外, 在用于海底管线铺设的 PISCIS 系统中, 也使用了“投票”概率变换来检测海底管线方向及接头位置, 实现对海底管线铺设情况的自动勘察。

本文针对水下激光成像系统^[2]的图像照度不均匀、对比度低及自然环境复杂等不利因素, 利用边缘方向信息及边缘连续性特征, 对传统的“投票”概率变换方法进行了改进, 实现了“投票”概率变换新方法。在实验室对设有树枝及物体等遮挡的水下模拟目标进行了检测。与传统的“投票”概率变换检测方法相比, 具有更强的抗干扰能力。

2 “投票”概率变换原理

直角坐标系 xOy 中任意直线 L 可用下述参数方程表示:

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

式中, ρ 是原点到直线的距离, θ 是 x 轴与直线间的夹角, 如图 1 所示(图像处理中, 由于光栅

* 国防科技预研基金及国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1999-04-02; 收到修改稿日期: 1999-05-07

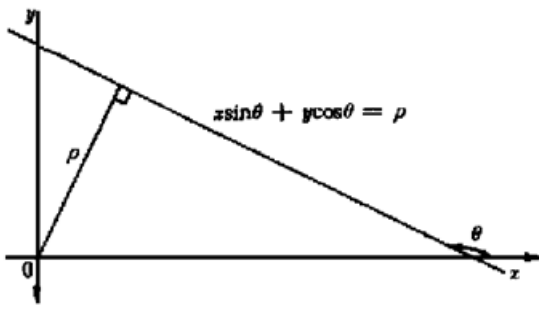


Fig. 1 Straight line equation

扫描顺序的原因,通常以朝下方向为 y 轴正方向)。

根据上面的定义,可以得到下面三个重要结论:

- 1) xOy 平面中的直线映射到参数空间中成为一个点;
- 2) xOy 平面中的点映射到参数空间中成为一正弦型曲线;
- 3) 共线的点在参数空间中对应的曲线交于所共直线对应的点。

所以,如果对曲边缘图像中的每一点进行“投票”概率变换,并对参数空间 (ρ, θ) 中每一点上通过的正弦型曲线数目进行计数,那么,这个数值越大,就说明线条图中落在直线上的点数越多,相应地,边缘图像中存在具有这一参数的直线的可能性也越大。设定一阈值,规定如果参数空间中某点的计数值超过这一阈值,就认为在输入的边缘图像中存在具有该点所对应参数的直线存在。这样,通过“投票”概率变换就能实现直线检测。

在“投票”概率变换中,每一个落在可能直线上的边缘点都增加了该直线存在的概率。这相当于利用边缘点对其所属直线进行“投票”,并由最终票数来判定直线存在与否。故而称“投票”概率变换为基于“投票”机制的检测方法。采用了这样的机制,只要区域边界上的大多数点满足预设的参数方程及某一确定的参数 α ,就可以取 α 作为边界的形状特征。所以“投票”概率变换对边界的局部缺失及畸变均不敏感,是一种“稳健”的目标检测方法。

尽管“投票”概率变换具有以上的优点,但在应用于水下目标成像识别时仍遇到了一些困难,如图 2 所示水下电视摄得的水下目标图及其边缘图像(通过 Canny^[3]边缘检测算法得到,取尺度参数 $\sigma = 2.0$)。

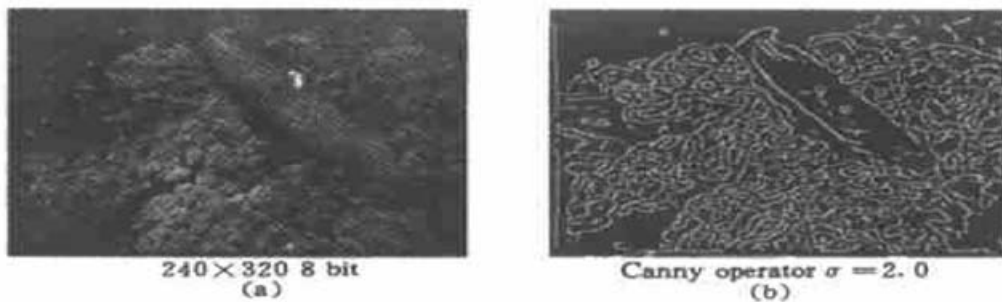


Fig. 2 The underwater target imaging and edge imaging

在对图 2(b) 使用“投票”概率变换后,得到的直线检测结果如图 3 所示。



Fig. 3 The detected results for line using Hough transform

图 3 表明: 由于大量的纹理边缘的干扰, 使得目标的直线轮廓无法在 $\rho-\theta$ 图中形成明显的计数峰值, 从而造成错误的检测。之所以会产生这些问题, 是因为在进行“投票”概率变换的过程中, 无论是纹理形成的边缘点还是目标轮廓边缘点, 都不加区分地获得了平等的“投票权”。而处在自然背景中的目标图像, 纹理边缘点的数目远远超过目标轮廓上的边缘点数目。所以, 在这样的条件下要实现可靠检测, 必须找到把纹理边缘与目标纹理边缘区分开来的新方法。下面介绍两种新算法。

3 利用边缘方向信息的改进“投票”概率变换

3.1 原 理

“投票”概率变换实际上得到的是边缘图中共线点的数目, 由于量化精度有限, 每一个累计小格对应的是图像平面上的一个狭长区域, 落在这个区域中的点, 无论是有效直线边缘点还是噪声边缘点, 都会被计入。当噪声点的数目远远大于有效边缘点数目时, 噪声分布不均匀性就会在最后得到的 $\rho-\theta$ 图中形成峰值, 从而淹没真正的直线型边缘, 使检测出错。那么, 如何在“投票”概率变换过程中将噪声边缘点与有效边缘点区别开呢?

直线型边缘与纹理或其它原因产生的噪声边缘在性质上显然不同, 前者边缘上每一点的方向与整个边缘的走向一致, 而后者的方向则相对离散。利用这一性质对“投票”概率变换进行改进, 在计数过程中, 将与直线走向不同的边缘点剔除, 以达到提高“投票”概率变换抗噪能力的目的。

3.2 实现方法

本工作采用了 Nevatia 和 Babu^[4]提出的一组 5×5 方向模板来计算局部边缘方向对边缘方向进行估计。

将图 4 中的 6 个模板对需要进行方向估计的点及其邻域进行卷积, 选择其中输出最大

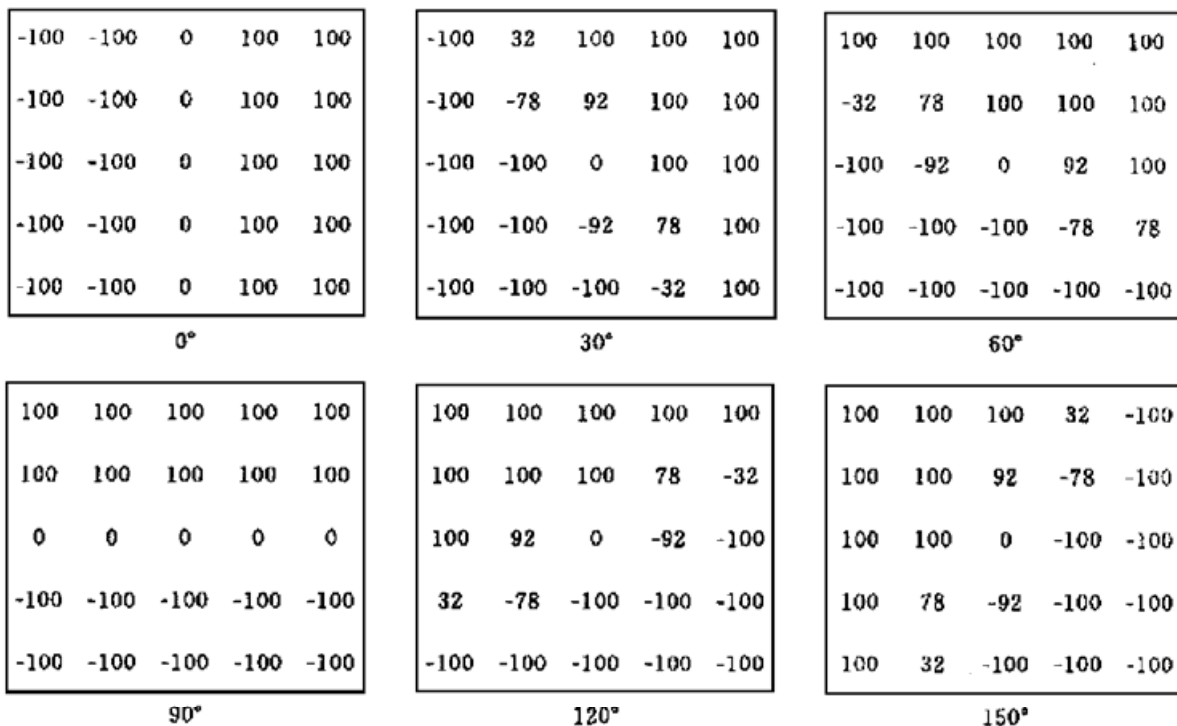


Fig. 4 Nevatia direction mould plate

者, 将它所对应的方向作为该点边缘方向的估计。实践证明, 以上模板具有合适的尺寸和参数, 在应用许多自然景物时均能获得很好的效果。

有了边缘方向的估计, 下一步就是讨论如何将这个估计应用到“投票”概率变换中去。实际上, 根据“投票”概率变换的定义, 引入边缘方向的约束是非常自然的。因为“投票”概率变换的目标参数空间中的 θ 就是边缘方向的描述。在有了对边缘方向估计的情况下, 只需对相应这方向的 θ 进行 ρ 值计算, 并将对应的量化单元进行累计就可以了。

3.3 效 果

在不用边缘点局部方向估计的“投票”概率变换中, 累计是对每个 θ 进行的。使用了方向信息后, 累计只对可能的 θ 进行。这样的改变对局部方向与整体方向一致的直线型边缘点来说, 理论上不受任何影响, 而对噪声边缘点来说, 则可以排除方向明显不符的累计值。

本工作所采用的模板将边缘分成了 6 个方向, 所以, 如果噪声边缘点方向是均匀分布的, 那么就只有 1/6 的噪声被计入。也就是说, 获得了 6 倍于原算法的噪声抑制能力。显然, 边缘方向的估计越精确, 得到的噪声抑制能力也越强。

应用本新算法对图 2 中的边缘图像进行变换, 得到 ρ - θ 图中处于前 10 位直线的计数值及其参数值, 如表 1 所示。

Table 1. The straight line detection results on edge detection

count value	185*	184*	176*	145*	143*	132*	125*	121*	116	115
ρ	73	73	73	73	73	73	73	84	72	71
θ	94	95	96	97	93	92	98	95	101	102

不难看出, 使用新算法后, 真正直线边缘值明显高于纹理噪声边缘的累计值, 在计数值最高的 10 条直线中占据了前 8 位(带*者)。即使计数值处于最后 2 位, 其 ρ 和 θ 值与直线型边缘的方向也相当接近。而且, 原先无法直接检出的另一侧平行直线边缘($\rho = 84$) 也获得了相当高的计数值(带★者)。

由此可见, 实验结果很好地说明了新算法在抑制纹理边缘噪声干扰方面的明显效果。

使用 Canny 算子^[3]也可以对边缘方向进行估计, 并可以得到更精确的边缘方向估计值。但此方法需要进行复杂的反余弦变换。从实验结果看, 使用 Nevatia 方向模板已经可以得到令人满意的效果了。

4 利用边缘连续性改进“投票”概率变换

4.1 原 理

在“投票”概率变换中引入边缘方向信息后, 明显地增强了“投票”概率变换的抗噪能力。但该方法需输入边缘图像, 还需从原始图像中计算边缘方向, 大大增加了计算量。而当观察图 2(b) 中的边缘图像时, 根本没有原始图像的先验知识, 仍能清楚地感知到目标的两条直线型边缘的存在。能做到这一点, 是因为边缘点之间的连续性进一步得到了边缘走向的信息。

对图 2(b) 边缘图像进行“投票”概率变换, 计数值最大的 3 个单元所对应的边缘点(通过逆“投票”概率变换得到)依次如图 5 中三个加亮区域①、②、③所示。从图中可以看到, 虽然落在区域①、②中的边缘点数目较多, 但由于纹理边缘走向复杂, 计数值是由许多很短的线段组成的。而水雷的直线型边缘因为具有与计数单元一致的走向, 参加计数的是连续的较长

线段。所以，如果对每计数单元线段长度进行考察，排除其中的短线段，就能起到抑制纹理边缘干扰，提高“投票”概率变换抗噪能力的作用。

4.2 实现方法

文献[5]考察了边缘图像的单次扫描过程中相邻边缘点间连接性质。作者实现了一种算法，在不增加“投票”概率变换计算复杂度的前提下，获得有关线条图中直线起始点和终点的信息。在这一方法的基础上做一些改动之后，实现了一种能有效抑制纹理噪声干扰的直线检测方法，下面介绍这一算法的实现。

假设对边缘图像由上而下，从左至右地逐点进行“投票”概率变换，那么，共线的边缘点在经过变换后将依次进入参数空间的同一个计数单元 $res(\rho, \theta)$ 。用一个存储单元 $pe(\rho, \theta)$ 保存前一个进入此计数单元的边缘点坐标，将当前边缘点坐标与它比较，即可检测到直线的中断。再增加一个存储单元 $pl(\rho, \theta)$ 以保存进入当前小格的连续边缘点数目，如果这一数目超过预先设定阈值，则在计数单元中计入这一数字，否则就认为当前线段无效，计数单元将不对它计数。算法实现流程框如图 6 所示。图 6 中， $P \times Q$ 阵中的 P 、 Q 分别是 ρ 、 θ 的量化级数； ρ 为原点到直线 L 的距离， θ 为 x 轴与直线 L 的夹角。



Fig. 5 The detected results using Hough transform corresponding to count range

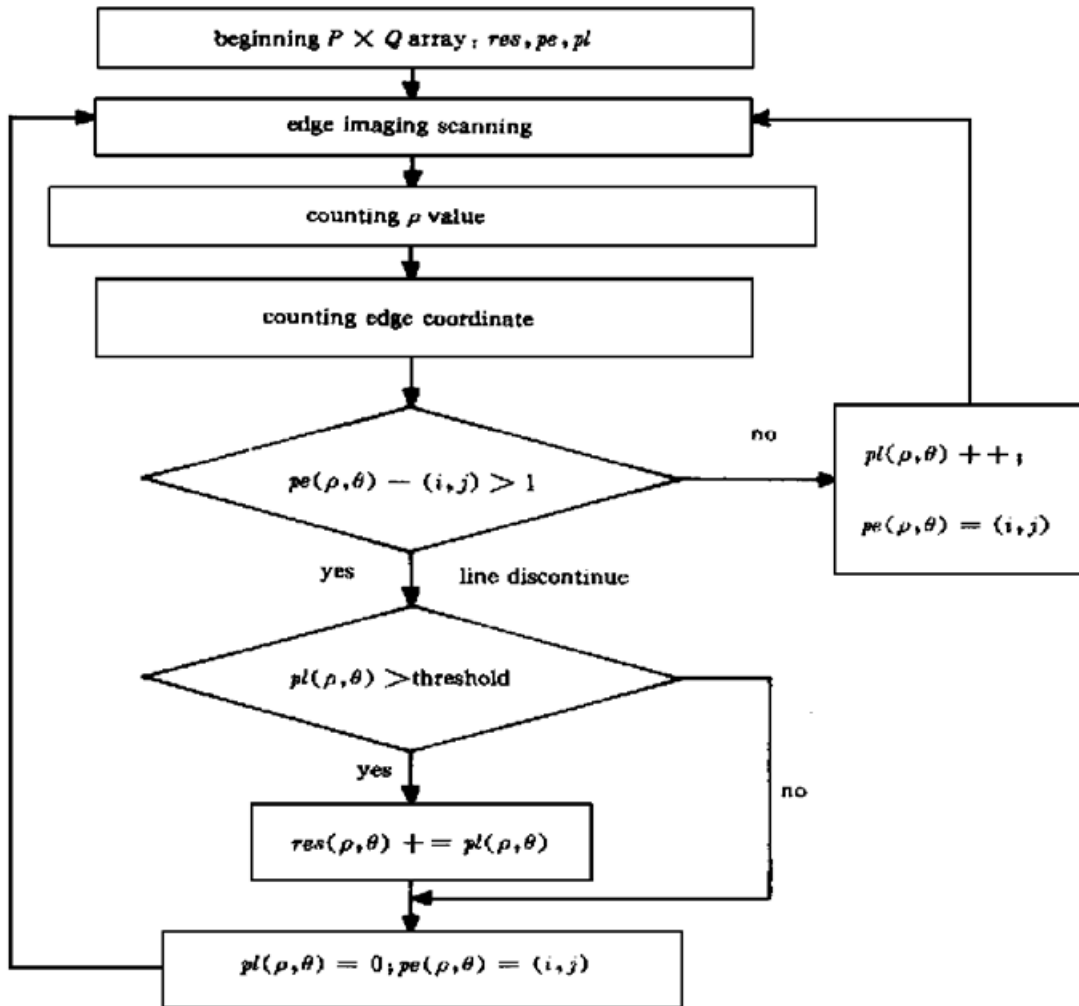


Fig. 6 Diagram of algorithm. res- results, pe- perhaps, pl- place

通过上述算法,实现了将过短的边缘图像排除的目的,而且没有增加算法的复杂度,内存的耗用也只增加了3个与 res 相同大小的整数矩阵(pe 需保存 x 和 y 坐标值)。

4.3 改进算法抗噪性能分析

采用了一种称之为低阈值和强邻抑制的细化方法后,得到的纹理边缘具有较好的连续性。它与目标直线边缘的不同在于它是由曲线构成的。

对参数空间 (ρ, θ) 中的任意单个计数单元 (ρ_m, θ_m) 进行考察,根据“投票”概率变换的实现算法可以证明,在图像平面上它对应于一个狭长区域(以下简称计数区域),这个区域的中轴线是直线 $\rho = x \cos \theta_m - y \sin \theta_m$, 其宽度等于 w , 即 ρ 的量化精度: $w = \rho_{\max}/P$ 。

对传统的“投票”概率变换,由于不考虑边缘点之间的连接关系,落在计数区域中的每一个边缘点都将对计数单元 (ρ_m, θ_m) 的计数值作出贡献。所以落在计数区域 (ρ_m, θ_m) 中的边缘点总数的期望值 $C(\rho_m, \theta_m) = wKd$, 其中 d 是纹理边缘点的分布密度, K 表示直线 L 长度的上限。因为纹理边缘点数目远多于目标边缘点数目,故可使用边缘点密度来作为 d 的估计。

在应用如图7模型描述的算法后,只有连续相邻的边缘点数目超过了规定的阈值时,这些边缘点才能作为一个可接受的线段参加计数。为了简化讨论,把纹理边缘与计数区域相交部分曲线用方向为 θ 的直线段近似。由于 w 很小,在绝大多数情况下,这个近似的误差是很小的。由简单的三角关系可见,落在计数区域 (ρ_m, θ_m) 中的线段长度 $L = w/\sin |\theta - \theta_m|$ 。所以 $L \in [w, +\infty]$ 。由于图像大小是有限的, L 是有限值,可以用 K 作为 L 的上限。假设选定阈值为 L_{th} , 采用新算法后,计数单元 (ρ_m, θ_m) 中计数值的期望值可以用下式表达:

$$C_{New} = C \sum_{L=L_{th}}^K [Lp(L)]/L_0, \quad (2)$$

式中 C_{New} 为计数值的期望值, $p(L)$ 表示线段长度为 L 的概率; L_0 为线段的平均长度, $L_0 = \sum_{L=L_{th}}^K Lp(L)$; $Lp(L)/L_0$ 的含义是落在计数区域中的边缘点属于长为 L 的线段的概率。

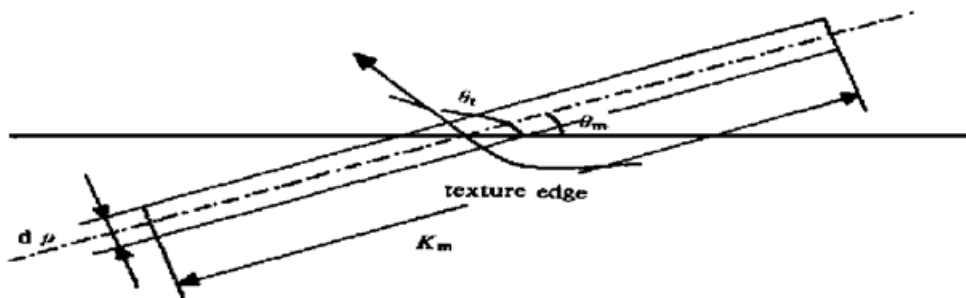


Fig. 7 Schematic diagram of the intersecting texture edge with count range

在上述假设的基础上,经过分析,可作出 $Lp(L)$ 与 L 的关系曲线,如图8所示(图像尺寸为 240×320 , 参数空间量化级数为 128×128)。

由图8可以看到,落在计数区域中的纹理边缘点,大部分是作为短线段参加计数的。通过阈值设置,将这些短线段排除,就可以达到抑制纹理噪声干扰的目的。显然,阈值取得越高,此算法对噪声的抑制能力就越强。在上述的条件下,假设计数区域长度 $K = \sqrt{M^2 + N^2}$ (最恶劣条件), M 、 N 分别表示一幅二值边缘数字图像的尺寸。阈值与噪声抑制能力关系如表2所示。

表2中数据是在最恶劣的假设条件下得到的。在实际图像中,由于纹理边缘的任意性,

Table 2. Relation of the ability to restrain noise with the threshold of linear scale

threshold	ineffective noise/%	S/N/dB
5	0.26	1.3
10	0.34	1.8
15	0.39	2.1
20	0.46	2.7

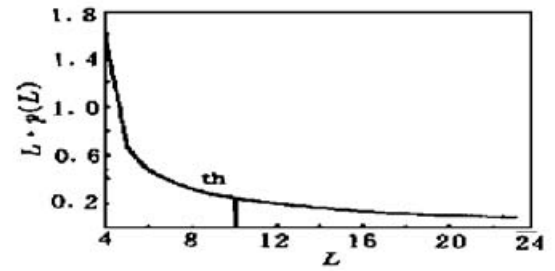


Fig. 8 Frequency distribution of linear scale

当 L 大于某一数值时已不能用直线段来近似, 导致大于这一长度的线段出现的概率远低于上面的计算结果。而且通过设置线段长度阈值, 对边缘图像中的孤立噪声点也有很强的抑制能力。所以新算法的改善效果要优于上述理论推算结果。

4.4 效 果

图9是对图2(b)中边缘图像采用不同的阈值后得到的 $\rho-\theta$ 图, 从图中可以清楚地看到随

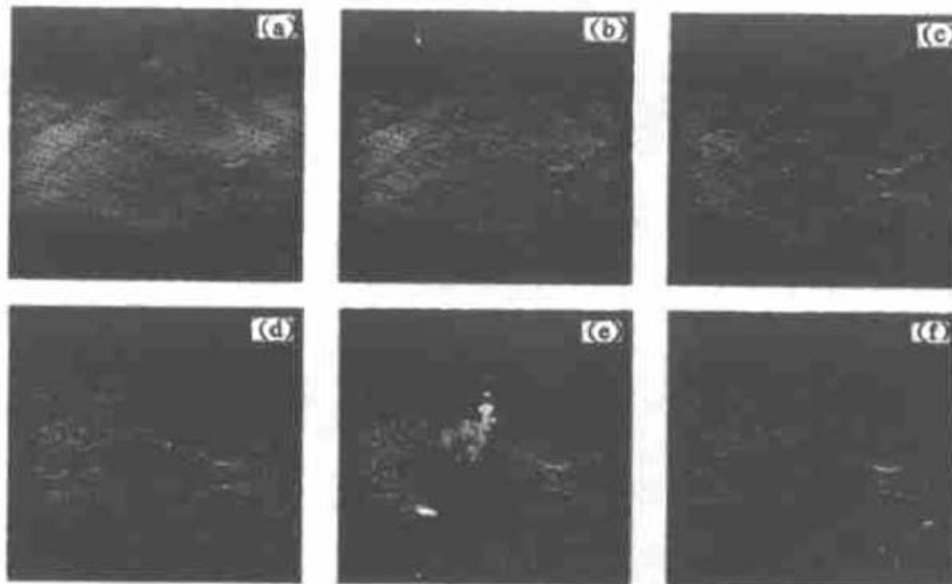


Fig. 9 Relation between Selection threshold and the ability to restrain noise. The threshold: (a) 0, (b) 3, (c) 5, (d) 10, (e) 15, (f) 20

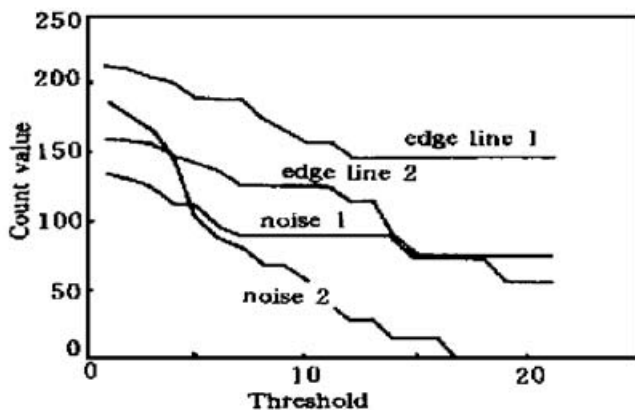


Fig. 10 Relation between the edge and the count value of texture noise with threshold. noise 1: if threshold is zero, maximum count value of noise cell, noise 2: if threshold is 16, maximum count value of noise cell

着阈值的增加, 算法对纹理边缘噪声抑制能力明显增强。

尽管噪声抑制能力随阈值的增加而单调增加, 但阈值并非越高越好。因为在实际的边缘图像中, 由于照明及噪声的影响, 往往也会造成有效直线边缘的中断。如果阈值取得过高, 会使由许多较短线段构成的直线边缘也被当作噪声去除, 这是人们不希望的。在图 9 所讨论的例子中, 两平行边缘对应计数值与阈值的关系曲线如图 10 所示。

由图 10 可看到, 当阈值大约为 5 时, 已完成有效的直线边缘检测。而当阈值

继续增加到 14 以上时, 由较多短线段组成的边缘线 2 的计数值将落到噪声曲线 1 之下。虽然还不会导致错误的检测结果, 但为了检测更可靠起见, 最好将阈值取为 10。

5 实验结果

为了检验本文改进的效果, 使用树枝及物体等遮挡, 以模拟自然纹理。对水下模拟目标图像进行了检测。结果见图 11(c)~ 图 11(f) 及图 12(c)~ 图 12(f)。图 11、图 12 中均有算法 1 与算法 2 的对比结果。所谓算法 1 是指通过导入边缘方向信息得到的改进算法。所谓算法 2 则是指利用检测边缘连续性的改进算法。图 11(d)、图 11(f) 和图 12(d)、图 12(f) 的检测结果, 分别是取前 5 条测定直线数据的平均值。在图 12 中, 实验条件是模拟目标被物体局部遮挡, 遮挡范围占总面积 50% 左右。在图 12(d) 检测结果中, 因为只利用边缘方向信息检测, 遮挡得多了, 环境又恶劣, 所以 5 次检测的平均值方向出错, 偏离目标实际边缘方向。然而, 图 12(f) 利用了边缘连续信息, 即增加了检测线段的起始点和终点信息, 即使在遮挡了 50% 目标后, 仍然具有很强的抗扰能力, 保持了直线检测的正确性。所获取的方向完全符合实际模拟目标边缘轮廓两平行线的方向。

表 3~ 表 6 是列出直线检测的前 5 条数据结果。而图 11(d) 及图 11(f) 是前 5 条数据线的平均值, 画在了被识别的物体上, 由图可见这两种算法检测, 轮廓方向均与实物一致。而图 12(d)、图 12(f) 亦是前 5 条数据线的平均值, 画在了被识别物体上, 第二种算法检测方向结果[图 12(f)]与物体一致, 而第一种算法检测结果[图 12(d)], 其轮廓直线方向与物体两平

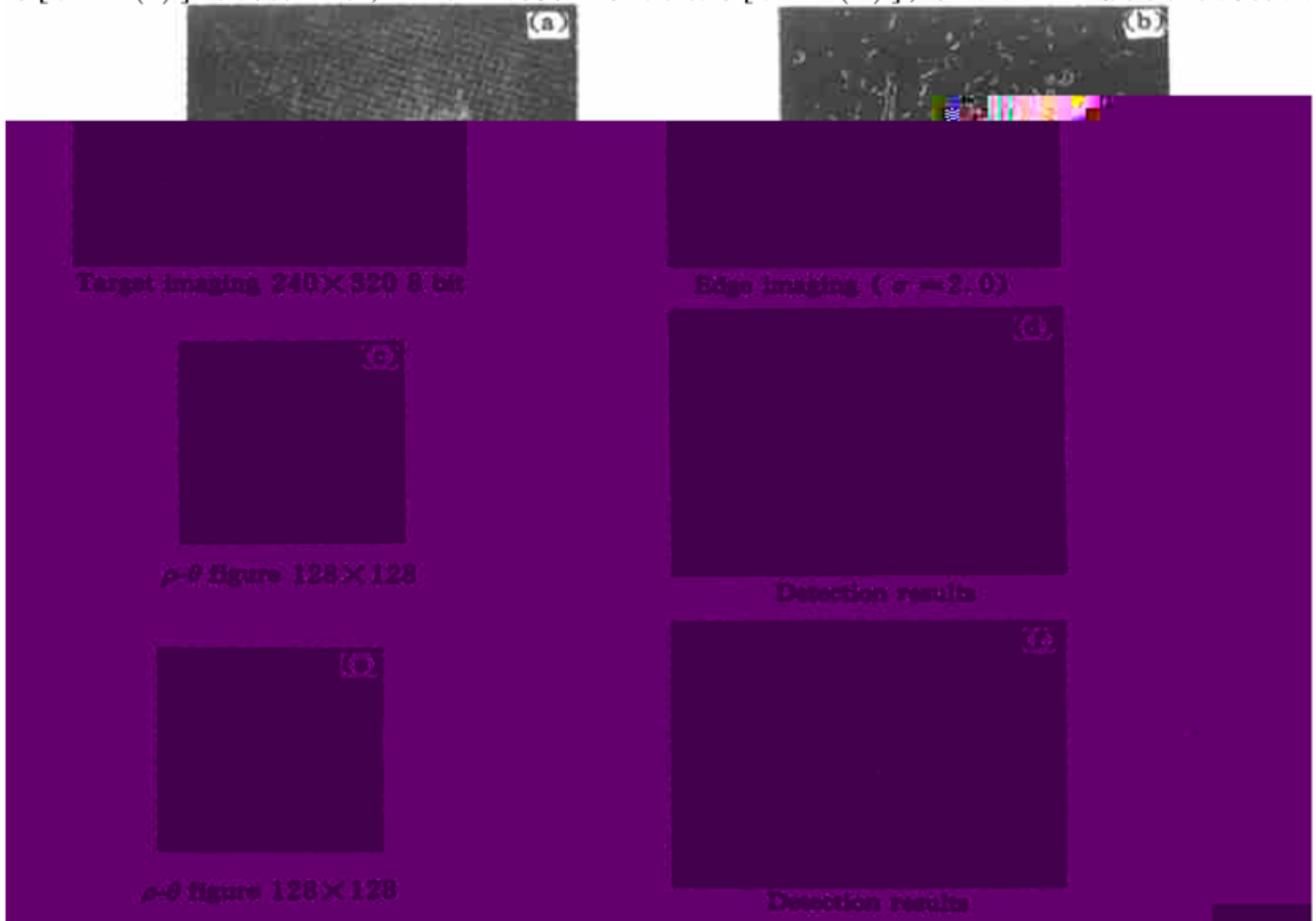


Fig. 11 Test results when target is covered by a branch, [(c)、(d) stand for the results with algorithm 1, (e)、(f) algorithm 2]

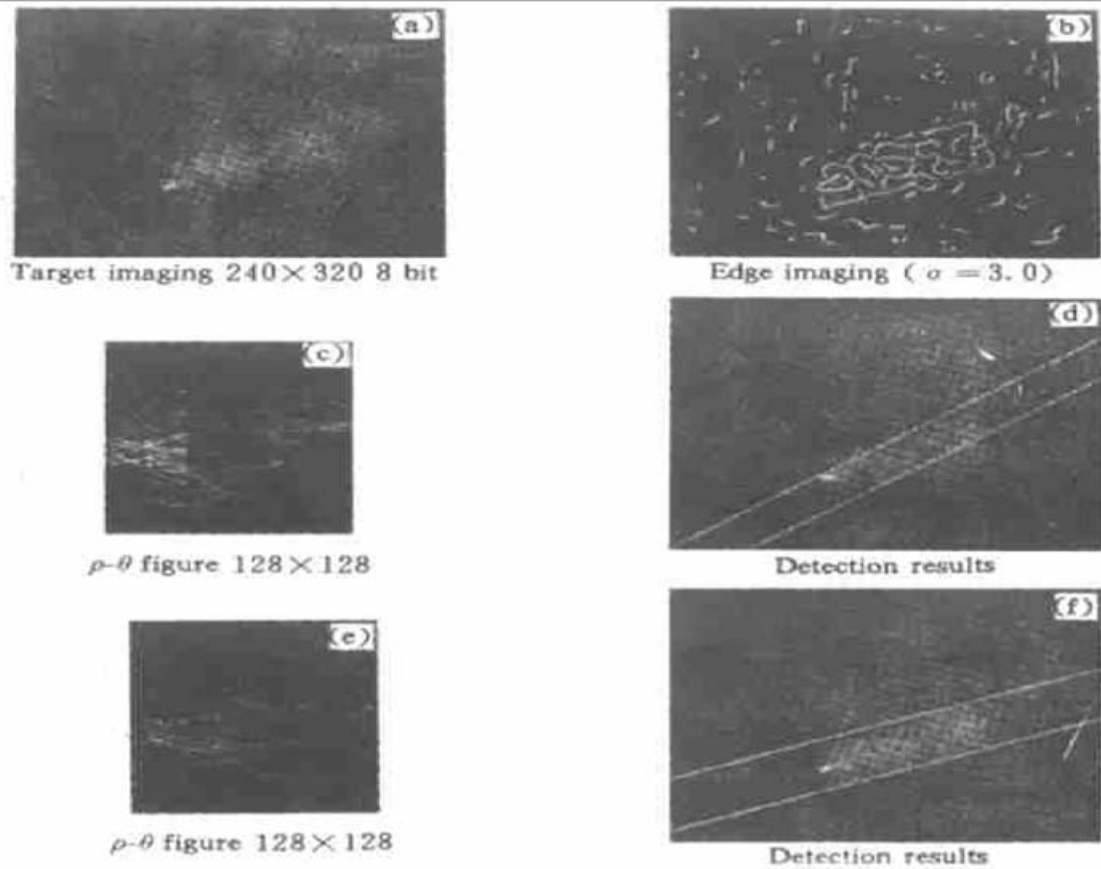


Fig. 12 Test result when target is partially covered by an object, [(c)、(d) stand for the results with algorithm 1, (e)、(f)-algorithm 2]

行线并不一致, 偏离比较多。由此可见, 第二种算法比第一种算法的抗干扰性能强, 具有更加高的实用价值。

Table 3. Data of straight line detection results (first 5 sets) [for Fig. 11(c), Fig. 11(d)]

count value	89	87	68	67	63
ρ	63	63	63	62	67
θ	15	14	16	23	25

Table 4. Data of straight line detection results (first 5 sets) [for Fig. 11(e), Fig. 11(f)]

count value	71	69	65	56	55
θ	63	63	63	69	74
ρ	14	15	13	31	13

Table 5. Data of straight line detection results (first 5 sets) [for Fig. 12(c), Fig. 12(d)]

count value	50	48	48	47	45
ρ	69	80	77	72	70
θ	24	15	22	27	22

Table 6. Data of straight line detection results (first 5 sets) [for Fig. 12(e), Fig. 12(f)]

count value	78	62	58	49	46
ρ	80	80	77	67	68
θ	14	15	10	14	17

结 论 使用了“投票”概率变换来实现特征匹配。由于“投票”概率变换是基于投票机制的算

法,对目标轮廓的局部缺失及畸变均不敏感,所以是一种稳健的目标检测方法。为了实现处于大量纹理中的水下激光成像目标特征的可靠检测,设计了两种“投票”概率变换的改进算法,即利用边缘方向信息和利用边缘连续信息的改进算法。实验表明:改进的这两种变换均比传统方法好,具有很强的抗干扰能力。在遮挡更严重的情况下第二种算法(利用连续性)比第一种算法(利用方向性)更好,更适合于在水下激光成像的复杂背景中实现目标的可靠检测,如图 12(d)、图 12(f)两种检测结果对比所示。

参 考 文 献

- [1] Hough P V C. *Method and Means for Recognizing Complex Pattern*, U. S. Patent 3069654, 1962. 128~ 139
- [2] 袁易全. 一种激光扫描水下成像系统的衰减长度值研究. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1410~ 1414
- [3] Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **PAMI-8**(6): 679~ 697
- [4] 荆仁杰, 叶秀清, 徐胜荣等. 计算机图像处理, 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 369~ 378
- [5] Li H F, Pao D, Jayakumar R. Improvements and systolic implementation of the Hough transformation for straight line detection. *Pattern Recognition*, 1989, **22**(6): 697~ 706

Underwater Target Detection Against Texture Background Using Hough Transform

Yuan Yiquan Wang Mingmin

(*Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210018*)

(Received 2 April 1999; revised 7 May 1999)

Abstract The image of underwater laser imaging system (UWLIS) normally has poor contrast and high noise. To detect edges under this circumstance, two algorithms for improving anti-noise performance of Hough transform are designed. One is by adding the additional information of the direction of edge points, another by checking the connectivity between the edge points. The experiment of the mine-like object recognition with two algorithms described above is given. This result shows that the improved algorithms are evidently superior to the conventional algorithms.

Key words Hough transform, underwater laser imaging, target detection.