

一种基于直线拟合的预浸料边缘直线在线视觉检测方法

倪金辉 肖 军 文立伟

(南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 210016)

摘 要 应用在线视觉检测鉴别预浸料的表面缺陷是一项全新的质量控制方法。为精确检测预浸料宽度变化,需将预浸料边缘信息从图像空间变换到参数空间。为解决传统标准 Hough 变换运算量大的问题,根据“多对一”映射原理,结合预浸料图像特征,提出一种基于“局部-整体”思想的预浸料边缘直线快速检测方法。该算法通过局部区域粗略拟合、误差补偿、噪声筛选,再全局精确拟合等步骤,在保证检测精度的同时,大大提高了检测效率。在具有高斯噪声和脉冲噪声干扰的情况下,该算法的检测精度与 Hough 变换相当,而运算速度可以提高 10 倍左右。

关键词 自动铺丝,预浸料,视觉检测,边缘拟合,直线检测,Hough 变换

中图法分类号 V261,TP391 文献标识码 A

Real-time Visual Inspection Method to Detect Prepreg Edge Straight Based on Line Fitting

NI Jin-hui XIAO Jun WEN Li-wei

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Using real-time visual inspection to identify the prepreg surface defects is a new quality control method. In order to detect the width changing of prepreg accurately, the prepreg edge needs to be transformed from image space into parameter space. To solve the problem that the traditional Hough transform has large amount of computation, according to “many-to-one” mapping principle, this paper combined with prepreg image features, proposed a prepreg edge line detection method based on linear fitting. Through rough fitting, error compensation, noise filtering and precise fitting, this algorithm can ensure the inspection accuracy and greatly improve the detection efficiency. In the case of adding Gaussian noise and impulse noise, the accuracy of this algorithm is almost the same with Hough transform and the operation speed can be increased about tenfold.

Keywords Automated fiber placement, Prepreg, Visual inspection, Edge fitting, Line detection, Hough transform

先进复合材料因其优异的性能,在国防、航空航天等领域得到广泛应用。自动铺丝是一种先进复合材料自动化成型技术,主要用于大曲率和复杂曲面构件的铺叠^[1-4]。因复合材料构件的结构形式、服役载荷和使用环境相当复杂,微小缺陷经跨层次蔓延生长可导致构件的失效,故其安全性、可靠性是其应用中需要首先考虑的内容^[5]。一般要求自动铺丝时预浸料的宽度为 $6.35 \pm 0.2\text{mm}$ ^[6],并且铺放的预浸料不出现劈裂、扭转等现象,以减少铺放构件中的重叠或者间隙等缺陷。高强度预浸纱制备主要采用宽幅预浸料分切方法制备,而对于空间应用的批次产品很小的高模量碳纤维预浸料,因其纤维强度和断裂伸长率远小于高强度碳纤维^[7],采用热熔法直接浸渍更具有实用价值。无论哪一种方法,在制备过程中由于张力波动、收卷速度变化等因素影响,导致预浸料的宽度发生变化,因此需要在制备过程中对预浸料的宽度进行实时检测。机器视觉检测方式可以将预浸料的宽度变化、劈裂、扭转等缺陷转化为数字图像,在计算机内部对这些缺陷进行分析判断^[8]。为精确检测出预浸料的边缘信息,需要将预浸料边缘

从图像空间转换到参数空间。

目前比较经典的方法是 Hough 变换,但 Hough 变换运算量大、速度慢,不满足实时检测的需要。文献^[9]提出了一种改进的 Hough 变换,该算法可实现峰值点的自动搜索,但是对图像预处理的要求较高,否则会产生大量的无效累积效应。文献^[10]利用边缘点的梯度信息检测直线,但是该算法的检测精度主要依赖于对梯度方向角的划分,若划分过多将影响检测速度,划分太少则降低检测精度。文献^[11]采用直线拟合的方法进行直线检测,能够快速检测出边缘直线,但是该算法受噪声影响较大,特别是边缘不平整的情况下将严重影响检测精度。KYRKIV^[12]等人提出了一种局部检测和全局检测相结合的改进算法,该算法可以有效提高变换速度,但抗干扰能力较差。虽然目前国内外对视觉检测中的直线检测技术进行了研究,但是对于预浸料这一特殊检测对象,国内外还没有相关报道。本文结合 Hough 变换的抗干扰能力强以及直线拟合速度快的优点,提出了一种基于直线拟合的预浸料边缘直线在线机器视觉检测的“局部-整体”分析方法。经

本文受国家 973 课题(2014CB046501),上海科委高技术项目(13111103300)资助。

倪金辉(1989—),男,硕士生,主要研究方向为先进复合材料自动化成型技术,E-mail:njh0018@163.com;肖 军(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为先进复合材料设计制造及自动化装备;文立伟(1970—),男,副教授,主要研究方向为复合材料自动化装备技术。

过实验验证,该方法相对于标准 Hough 变换在相同检测精度的条件下具有更快的运行效率。

1 标准 Hough 变换

1.1 标准 Hough 变换原理

1962 年,Paul Hough 提出了 Hough 变换,它所实现的是一种从图像空间到参数空间的映射。对于直线的变换,这种映射表现为图像空间中一点与参数空间中的某一条直线之间的对应关系。为了避免当二维平面中的直线的倾斜角为 90° 时斜率无穷大而导致累加器溢出,采用极坐标表示直线,表达式如下:

$$\rho = i \cos \theta + j \sin \theta \quad (1)$$

式中, i 和 j 分别表示像素点的行列坐标。

1.2 标准 Hough 变换实现步骤

(1) 参数空间离散化。由于计算机不能处理连续的参数,需要将参数 ρ 和 θ 离散化,设置一个 $H(m, n)$ 的累加器矩阵,其中 ρ 分成 m 等分, θ 分成 n 等分。

(2) 离散空间累加。对图像空间中每一个特征点 (i, j) , 用式(2)进行验证:

$$|\rho_m - i \cos \theta_n - j \sin \theta_n| < \gamma \quad (2)$$

其中, γ 为一个非负常量,用于补偿因参数离散化后带来的误差。若特征点满足该验证公式,则相应的累加器加一,直到将检测区域内的特征点遍历完毕。

(3) 最大值检测。检测区域内的特征点处理完毕后,查找累加器 $H(m, n)$ 中的最大值,累加器的值越大,说明符合这个直线参数的特征点越多。因此累加器最大值所对应的就是需要检测的直线参数^[13]。

Hough 变换基于“一对多”映射原理。对于一幅 $N \times N$ 的图像, ρ 和 θ 的取值范围为

$$-N \leq \rho \leq \sqrt{2}N, 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3)$$

完成整幅图像的处理需要进行 $m \times n \times N^2$ 次 Hough 变换,其中还不包括内部更为复杂的三角函数运算。为减少运算量,可以增大 ρ 和 θ 的离散步长,但是这种处理会影响直线检测的精度。因此,标准 Hough 变换不满足在线检测的实时性要求^[14]。

2 基于直线拟合的边缘直线检测

2.1 最小二乘法直线拟合

最小二乘法是一种数学优化技术,它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳匹配函数。

最小二乘法拟合直线虽然运算速度快,符合实时检测的需要,但是对噪声比较敏感,当预浸料边缘周围存在噪声时,会降低检测精度。

2.2 基于直线拟合的边缘直线检测

根据几何原理,一条直线在平面中的位置主要由两个参数决定,即斜率 k 和截距 b ,因此在一个很小的模板区域内就能确定整条直线的参数。如图 1 所示。

在理想状态下,通过检测模板区域 Q 内的线段 L_1 ,就能

确定整条直线 L_2 的位置参数。为此,本文采用“局部_整体”的思想,在较小的模板区域内,计算特征点所确定的直线参数,然后设定一个误差容许系数,根据此直线参数以及误差容许系数在全图范围内搜索该直线上的其他点并放入辅助数组 $T(m, n)$ 内;对辅助数组 $T(m, n)$ 内的特征点进行拟合,得到精确的直线方程。

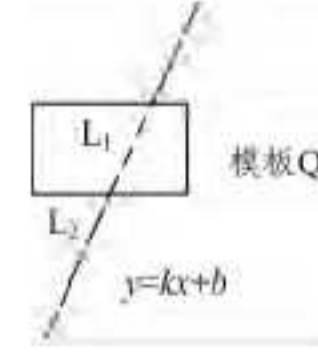


图 1 “局部_整体”直线拟合原理

2.3 边缘直线附近噪声点筛选

预浸料边缘存在一些纤维毛刺引起的伪边缘点,这些点在全图搜索时也被包含在辅助数组 $T(m, n)$ 内。由于拟合直线必须满足轮廓上的点到直线上的平方距离和最小,因此最终直线的方向将偏离预浸料边缘。

采用最小二乘法直线拟合对于大的离群值是不够鲁棒的。由于采用的是平方距离,那些与直线距离较远的点在拟合过程中会拥有非常大的权重。为此,文中为每个点引入权重系数 w_i 。对于那些远离直线的点,其权重系数 $w_i \ll 1$ 。因此,最小化过程变为:

$$Q = \sum_i^N w_i [y_i - (kx_i + b)]^2 \quad (4)$$

权重系数 w_i 是基于点到直线的距离 l_i :

$$l_i = \frac{|kx_i - y_i + b|}{\sqrt{1+k^2}} \quad (5)$$

但是在拟合直线时我们并不能得到这些距离。解决的方法是采用多次迭代来拟合直线。在第一次迭代时使 $w_i = 1$,即使用标准的最小二乘法拟合直线,并依据式(5)计算出距离 l_i 。通过一个权重函数 $w(l)$,用已经计算出来的距离定义权重,将这些权重用于后续的迭代过程中。本文使用 Tukey 权重函数^[15],其定义为:

$$w(l) = \begin{cases} [1 - (l/\tau)^2]^2, & |l| \leq \tau \\ 0, & |l| > \tau \end{cases} \quad (6)$$

式中, τ 为削波因数,它定义哪些点是离群值。此权重函数完全忽略那些距离大于 τ 的点,而距离小于 τ 的点,其权重值在 $0 \sim 1$ 之间变化。

削波因数代表的是一个距离,它可以被手动设置,但是这将忽视噪声的分布和数据中的离群值,因此从数据自身推出削波因数更加实用。定义削波因数为:

$$\tau = \bar{l} + \sigma_l \quad (7)$$

式中, \bar{l} 为各点到直线的距离 l_i 的平均值, σ_l 为其标准偏差。在标准正态分布中,此削波因数包含 81% 的点。

2.4 算法具体步骤

首先将预浸料图像进行降噪和 Canny 边缘检测算法处理,得到边缘亮度为 255、其余亮度为 0 的二值化图像。在进行直线检测之前,首先设定整个检测过程所需要的直角坐标

系。在该坐标系中,原点位于图像左上角, y 轴方向为水平向右, x 轴方向为垂直向下。

直线检测步骤大致如下:

第一步 粗略求得模板检测区域内边缘亮点间的线性关系。

具体做法:设定一个像素尺寸大小为 $i \times j$ 的检测区域模板 Q ,这个模板 Q 在整幅图像区域 P 内以水平方向的步长为 i 、垂直方向的步长为 j 进行移动。统计模板 Q 所覆盖区域的边缘特征亮点数。对这个区域内的亮点进行直线拟合,得到估计参数 k_1 和 b_1 以及相关系数 r_1 。由于这个区域内部的亮点没有进行任何处理,其中也包含了一些预浸料表面因树脂分布不均匀而引起的亮点,以及一些虚假的边缘亮点,这将影响估计参数的精度,因此需要相关系数对这条估计的直线进行判断。若

$$|r_1| > \zeta_1 \quad (8)$$

则认为该区域内的边缘亮点之间是具有一定线性关系的,可以进行下一步运算。其中 ζ_1 为相关系数阈值。

第二步 遍历整幅图像的离散空间,寻找具有一定线性关系的边缘亮点。

具体做法:根据第一步得到的估计参数 k_1 和 b_1 ,建立直线方程

$$y = k_1 x + b_1$$

遍历整幅图像的 ROI 区域,对 ROI 内的每一个边缘特征亮点 (m, n) 用下式进行验证:

$$|n - k_1 m - b_1| < \gamma \quad (9)$$

其中, $0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N, M, N$ 分别为 ROI 区域内行列数, γ 为误差容许系数。当边缘亮点满足上式时,将辅助数组 $T(m, n)$ 的值置为 1。

第三步 对图像离散空间内具有一定线性关系的离散点再次进行直线拟合。

具体做法:遍历第二步计算得到的辅助数组 $T(m, n)$ 内的每一个点,统计数组 $T(m, n)$ 内值为 1 的点。这些点就代表了图像 ROI 区域内灰度值为 255 且满足式(9)的像素点。对这些点进行直线拟合,得到一条新的直线 L ,该直线可用下式表示:

$$y = k \times x + b \quad (10)$$

第四步 再次筛选噪声点。

为提高直线检测的精度,需减小直线附近噪声点的影响。具体做法:

用式(4)以及式(6)对辅助数组 $T(m, n)$ 内点进行多次迭代拟合,逐渐减小离群点对检测精度的影响。

设定迭代次数 $cycle_number$ 为 3,经多次迭代后,过滤边缘附近的离群点。

最后,为防止只有个别干扰点所组成的直线的存在,需要对符合最终直线的特征点数 A 进行检验。在此设定一个最少特征点数阈值 f ,若

$$A \geq f$$

则认为这条直线是由边缘亮点组成的。

如前文所述,直线检测的流程大致如图 2 所示。

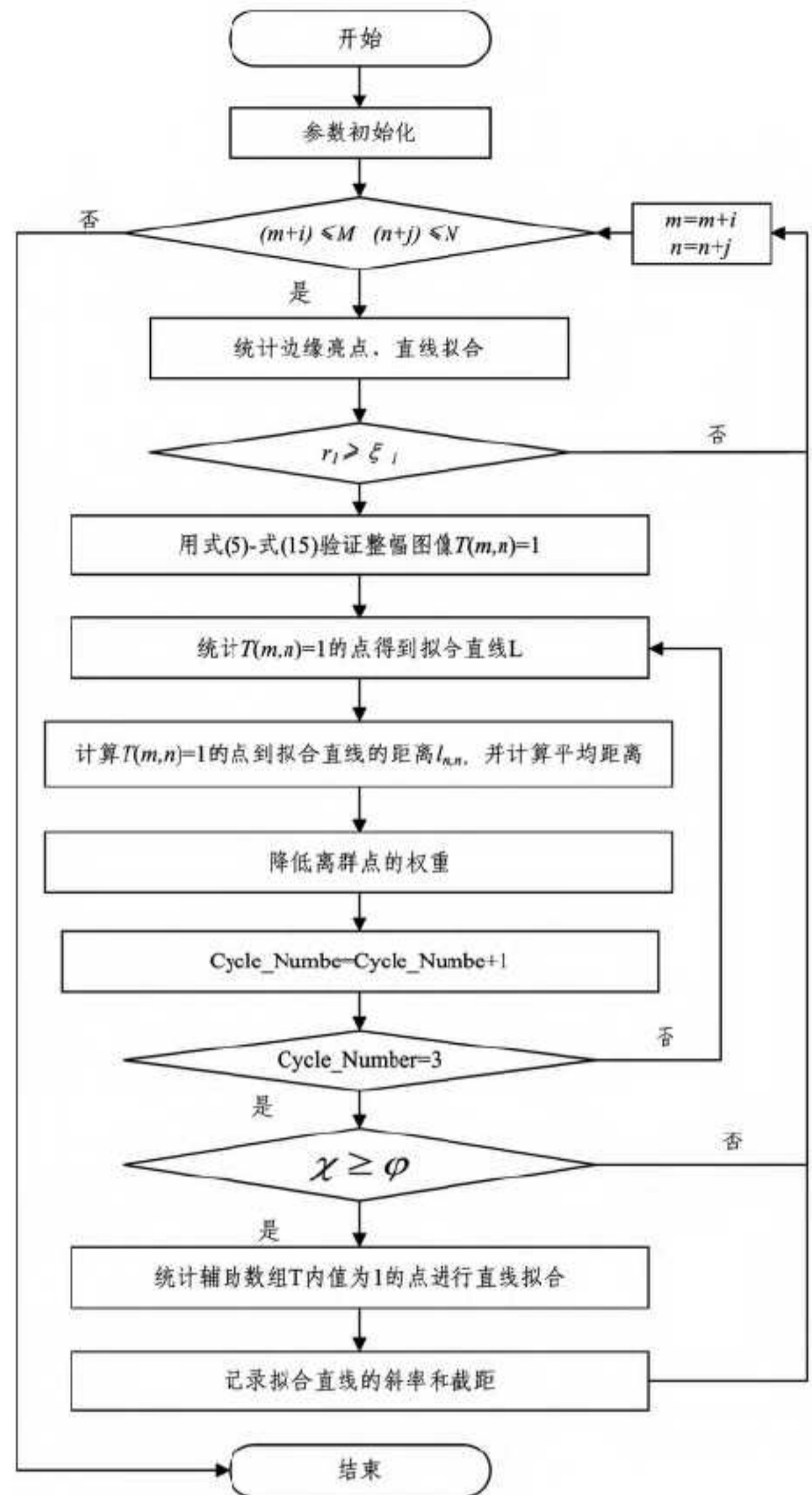


图 2 算法流程

3 参数设定

本文需要设定 3 个参数,分别是相关系数阈值、误差容许系数 γ 以及边缘特征点数阈值 f 。

3.1 相关系数阈值

相关系数 r 是用来衡量两个变量之间线性关系的系数。一般将相关系数划分为 3 个等级: $0 < |r| < 0.4$ 为低线性相关; $0.4 \leq |r| < 0.7$ 为显著线性相关; $0.7 \leq |r| < 1$ 为高度线性相关。在预浸料制备过程中会造成纤维损伤,比如纤维断裂,在张力作用下脱离树脂的浸润,最终外露在预浸料边缘的外侧。经过图像预处理以及 Canny 算法提取边缘后,这些外露在预浸料边缘的细小碳纤维也形成伪边缘特征亮点。由于这些伪边缘特征亮点的存在,模板 Q 区域内的特征亮点的线性关系会受到一定的影响,因此相关系数阈值 ζ_1 也会相应降低。若相关系数阈值 ζ_1 过低,导致受噪声影响严重的区域检测出符合要求的直线,最终会影响检测的精度或增加程序运算量。因此,在多次试验之后取相关系数阈值 ζ_1 为 0.6。

3.2 误差容许系数

误差容许系数主要是用于补偿图像空间参数离散化所带来的误差。同时,由于预浸料边缘并非是完美的直线,因此需

要一个误差补偿系数将那些不处在一条直线上的点包含于同一个拟合点集内。误差容许系数若太小,则会将真正的边缘点排除在拟合点集之外;误差容许系数若太大,则会将那些噪声点也包含在拟合点集内,虽然这些噪声点在迭代筛选之后会被删除,但是会加大计算量,增加检测耗时。综合考虑,误差容许系数选为 15。

3.3 特征点数阈值

在某些特殊情况下,若干个噪声点在经过前几步运算之后也能组成一条直线,但是这条直线并非真实的预浸料边缘,因此需要一个特征点数阈值以防止这种情况出现。在预浸料检测中图像的尺寸为 480×512 像素,正常情况下预浸料的边缘 3(a) 所示,贯穿整个竖直方向。因此本文特征点数阈值 f 选为 250。

4 实验结果与分析

4.1 本文算法验证

为了验证该算法的检测精度与运算速度,实验选取了一幅预浸料图像进行验证,如图 3(a) 所示。同时为了验证该算法的抗噪性,在原图的基础上分别加入了高斯噪声和脉冲噪声,如图 3(b) 和图 3(c) 所示。在速度和精度上与标准的 Hough 变换进行比较,最终检测的直线图像如图 4 所示。原图实验结果如表 1 所列,高斯噪声图像实验结果如表 2 所列,脉冲噪声图像的实验结果如表 3 所列,实验中 ROI 区域为 480×480 像素,每个像素点代表的实际尺寸约为 0.03mm。

实验中针对每一幅图像都进行了两次 Hough 变换,第一次 ρ 和 θ 的离散步长分别为,

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= (1+\sqrt{2})\rho/100 \\ \Delta\theta &= \theta/100 \end{aligned} \quad (11)$$

第二次 ρ 和 θ 的离散步长分别为,

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= (1+\sqrt{2})\rho/1000 \\ \Delta\theta &= \theta/1000 \end{aligned} \quad (12)$$

标准 Hough 变换中,离散步长越小,检测结果越精确,但是计算耗时增加。本文算法与小步长的 Hough 具有相同的精度,但是运算速度比大步长的 Hough 快 10 倍左右。

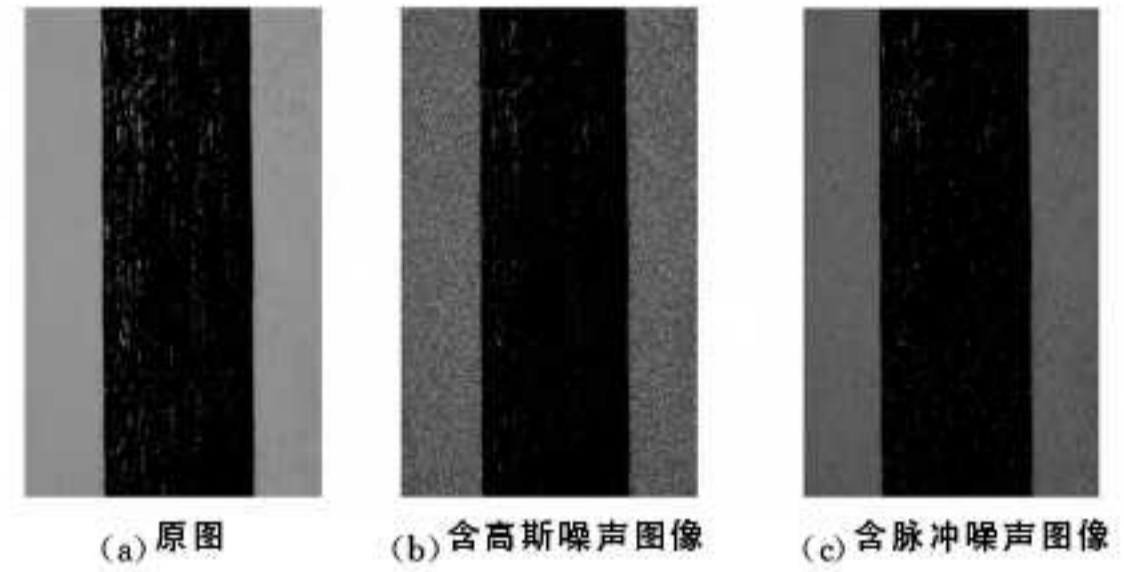


图 3 实验验证图像

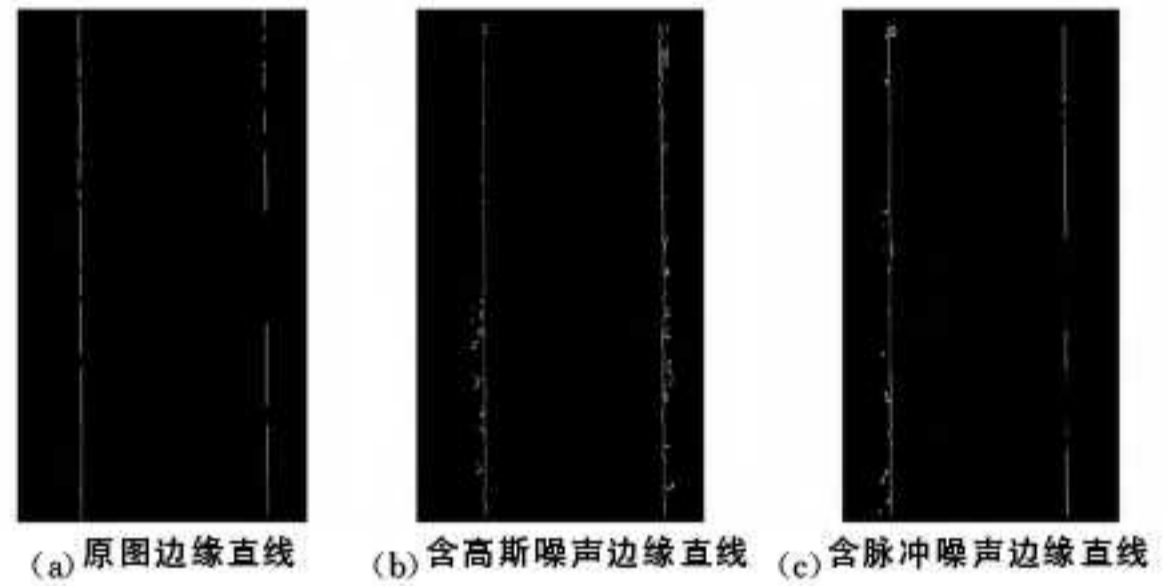


图 4 各图像检测结果

表 1 对于原图,本文算法与 Hough 变换比较

	本文算法	Hough 变换		Hough 变换	
		$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/100$	$\Delta\theta=\theta/100$	$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/1000$	$\Delta\theta=\theta/1000$
Line 1	$y=0.00895 \times x+135.07$	$y=0.00698 \times x+137.89$	$y=0.00628 \times x+135.57$		
Line 2	$y=0.01000 \times x+390.44$	$y=0.00698 \times x+393.96$	$y=0.01257 \times x+389.32$		
times/ms	87	863	Info		

表 2 对于高斯噪声污染图像,本文算法与 Hough 变换比较

	本文算法	Hough 变换		Hough 变换	
		$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/100$	$\Delta\theta=\theta/100$	$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/1000$	$\Delta\theta=\theta/1000$
Line 1	$y=0.00805 \times x+135.11$	$y=0.00314 \times x+127.46$	$y=0.00698 \times x+135.57$		
Line 2	$y=0.04617 \times x+385.13$	$y=0.00314 \times x+393.98$	$y=0.01012 \times x+388.19$		
times/ms	221	3270	Info		

表 3 对于脉冲噪声污染图像,本文算法与 Hough 变换比较

	本文算法	Hough 变换		Hough 变换	
		$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/100$	$\Delta\theta=\theta/100$	$\Delta\rho=(1+\sqrt{2})\rho/1000$	$\Delta\theta=\theta/1000$
Line 1	$y=0.01208 \times x+135.32$	$y=0.00314 \times x+138.90$	$y=0.01012 \times x+135.58$		
Line 2	$y=0.01423 \times x+390.43$	$y=0.00314 \times x+393.98$	$y=0.01326 \times x+390.51$		
times/ms	187	1395	Info		

4.2 本文算法偏差

由于正常预浸料的两条边缘是近似平行的,因此,可以取 Line1 上 x 轴坐标为 0、240、480 的 3 点到 Line2 的距离的平均值表示预浸料的宽度,即

$$d = \frac{d_0 + d_{240} + d_{480}}{3} \quad (13)$$

定义该算法的误差为

$$\delta_1 = \frac{|d_f - d_H|}{d_H} \times 100\% \quad (14)$$

式中, d_f 为本文算法所得宽度, d_H 为小步长 Hough 变换所

得宽度。

定义该算法在有噪声情况下与原图像的误差为,

$$\delta_2 = \frac{|d_n - d_o|}{d_o} \times 100 \quad (15)$$

式中, d_n 为噪声图像中本算法解得的宽度, d_o 为原图像中本算法解得的宽度。

误差结果如表 4 所列,表中 d_o 为原图像中预浸料的宽度, d_G 为被高斯噪声污染图像中预浸料的宽度, d_I 为被脉冲噪声污染图像中预浸料的宽度。

(下转第 23 页)

度,加入规避列表,避免了虚拟机所占用的资源超过服务器资源上限,并达到了组合优化的目标。实验证明了该算法的有效性,同时算法的收敛速度得到了提高。

下一步工作将主要围绕算法复杂度的改进和解决高维多目标优化问题展开。

参 考 文 献

[1] Nelson M, Lim Beng-Hong, Hutchins G. Fast Transparent Migration for Virtual Machines [C] // Proceedings of USENIX ATC. 2005

[2] Deb K. Multi-Objective Optimization [M]. Springer: Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, 2001: 13-46

[3] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197

[4] 李强, 郝沁汾, 肖利民, 等. 云计算中虚拟机放置的自适应管理与多目标优化 [J]. 计算机学报, 2011, 34(12): 2253-2264

[5] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks.

volume 4, 1995

[6] 黄敏, 江渝, 毛安, 等. 基于全局最优位置自适应选取与局部搜索的多目标粒子群优化算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34(4): 1074-1079

[7] 冯金芝, 陈兴, 郑松林. 一种改进的多目标粒子群优化算法及应用 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 1001-1005

[8] Xu J, Fortes J. Multi-objective virtual machine placement in virtualized data center environments [C] // Proceedings of 2010 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom'2010). Hangzhou, 2010: 179-188

[9] 程理民, 吴江, 张玉林. 运筹学模型与方法教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

[10] Calheiros R N, Ranjan R, De Rose C A F, et al. Cloudsim: A novel Framework for Modeling and Simulation of Cloud Computing Infrastructures and Services [R]. GRIDS-TR-2009-1. Grid Computing and Distributed Systems Laboratory, The University of Melbourne, Australia 2009

[11] Deb K. Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problem [J]. Evolutionary computing, 1999, 7: 205-230

(上接第 19 页)

表 4 检测误差

	d_0	d_G	d_I
本文算法	255.5626	258.759	255.5865
Hough 变换	255.2288	253.3537	255.6493
δ_1	0.13%	2.12%	0.02%
δ_2	0%	1.25%	0.01%

实验表明,文中的方法在保持与标准 Hough 变换相同精度的前提下,大大提高了直线检测效率。加入噪声后,计算机需要处理的特征点数增加,所以检测时间增加。由于脉冲噪声是随机分布的,只有部分噪声点分布在边缘附近,这些噪声可以通过迭代拟合被删除,因此脉冲噪声对该算法的检测精度影响较小。高斯噪声属于加性噪声,即噪声值直接加到原图上,使边界模糊。因此在高斯噪声的影响下,该算法的检测精度略有下降。

结束语 1) 基于“多对一”的映射原理,结合热熔法制得预浸料图像的特点,提出了一种基于直线拟合的预浸料边缘直线检测方法。

2) 所提算法利用“局部_整体”的思想,相比 Hough 变换大大减少了计算量,提高了检测速度。

3) 直线拟合时引入权重系数,通过迭代计算,有效抑制预浸料边缘因纤维损伤外露而引起的伪边缘点对检测精度的影响,提高了检测的鲁棒性。

参 考 文 献

[1] 文立伟, 张建宝, 肖军, 等. 大型筒段构件自动铺带成型技术 [J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2456-2461

[2] Gutowski T G. Advance composite manufacturing [M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1997: 32-83

[3] 李俊斐, 王显峰, 肖军. 开孔曲面自动铺放轨迹规划算法研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1716-1723

[4] 李俊斐, 王显峰, 肖军. 网格化曲面的固定角度铺丝轨迹规划算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(9): 1410-1415

[5] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12

[6] 张旭坡. 自动铺丝预浸纱制备技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007

[7] 李成功, 傅恒志, 于翹. 航空航天材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 132-133

[8] Hogg M W. Method for laying composite tape; U. S. Patent 7, 842, 145 [P]. 2010-11-30

[9] 丁幼春, 陈红. 基于 HT 的多条直线的检测特点及其算法改进 [J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(6): 802-806

[10] 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

[11] 宋冬冬, 薛锴. 基于直线拟合的高温板材边缘检测方法 [J]. 工具技术, 2010, 44(7): 37-39

[12] Kyrki V, Kälviäinen H. Combination of local and global line extraction [J]. Real-Time Imaging, 2000, 6(2): 79-91

[13] Galamhos C, Matas J, Kittler J. Progressive probabilistic Hough transform for line detection [C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. New York, NY, USA: IEEE, 1999: 1-10

[14] 王燕清, 辛柯俊, 陈德运, 等. 基于启发式概率 Hough 变换的道路边缘检测方法 [J]. 计算机科学, 2013, 9(40): 279-287

[15] Huang Qiang, Li Ming, Ji Zhen. Precisely Locating Multi-QR Code Based on Straight Line Fitting [C] // 2010 Chinese Conference on Pattern Recognition (CCPR). New York, NY, USA: IEEE, 2010: 1-5