

文章编号: 0258-7025(2004)04-0452-05

激光多灰度图像标刻中自适应纹理模板 及图像矫正算法的研究

黄立华¹, 刘晓东¹, 齐红基²

(¹ 华中科技大学激光技术与工程研究院, 湖北 武汉 430074; 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 多灰度图像的激光标刻是目前激光标刻中研究最为活跃的内容之一,但目前多灰度标刻的软件主要存在标刻后图像不逼真、缺乏层次感且对失真图像矫正效果不理想等缺点,在利用 5×5 固定模板实现图像多灰度标刻的基础上,考虑到图像中相邻像素点的灰度关系,对除边缘像素点外的每个像素点在 3×3 窗口范围内进行差分运算,提取该像素点在局域内的纹理特征,并据此来选择模板实现多灰度图像标刻。另外,利用拉格朗日二次抛物线插值法对输出图像的位置坐标进行矫正,矫正公式中 x 方向和 y 方向的最大畸变量分别为 80 和 90,基本上能消除双振镜扫描引起输出图像几何畸变的影响。标刻的图像能很好地表现原图像的信息,且实现算法简单,图像质量得到了明显改善。

关键词 激光技术;激光标刻;自适应纹理模板;畸变矫正;双振镜扫描

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Study of Self-adaptive Texture Template and Distortion Correction in Multi-Gray Laser Marking System

HUANG Li-hua¹, LIU Xiao-dong¹, QI Hong-ji²

(¹ Institute of Laser Technology & Engineer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Recently, multi-gray laser mark is one of the most interesting fields in laser mark. But, the software used in multi-gray laser mark can't produce living, well-bedded, orthoscopic image. In this paper, based on multi-gray laser mark and 5×5 evenly distributed template, the gray relationship of adjacent pixels is considered. Except for marginal pixels, differential operation has been used to every pixels across the window of the size of 3×3 pixels, then texture characteristics are discriminated locally. Based on the local texture in images, corresponding templates are selected. Furthermore, the distortion for dual galvanometer scanning is corrected with the method of Lagrange second-degree parabola interpolation, where the value of distortion in the direction of x - and y -axes are 80, 90, respectively. The aesthetic appearance of marked images is improved greatly removing the effect of trace of matchboard and distortion of dual galvanometer scanning.

Key words laser technique; laser marking; self-adaptive texture templates; distortion correction; dual galvanometer scanning

1 引 言

激光标刻是近十几年随着激光技术发展而产生的一种新的标刻技术^[1~3]。对多灰度图像的标刻是

激光标刻技术的发展方向,也是目前激光标刻中研究最为活跃的内容之一^[4]。除了激光器的参数如脉冲宽度、脉冲能量及标刻材料等硬件部分影响图像的质量外,用于激光标刻的算法对于图像的质量也

收稿日期:2002-12-04; 收到修改稿日期:2003-03-18

作者简介:黄立华(1977—),女,华中科技大学激光技术与工程研究院硕士研究生,研究方向为激光加工理论和方法。
E-mail: aginu@163.com

有决定性的作用。目前用于激光多灰度标刻的软件主要存在以下两个方面的缺陷：1) 实现多灰度标刻的算法还不成熟，对原图像信息表现不充分，激光标刻后的图像不逼真，缺乏层次感。2) 用于矫正图像边沿桶形或枕形失真的方法较为复杂且矫正效果不理想，矫正后的图形纵横比例不匹配。本文针对以上两方面的内容提出了用 5×5 模板匹配方法以及自适应纹理模板算法来标刻图像，并且采用拉格朗日二次抛物线插值法对振镜偏转扫描引起的输出图像位置畸变进行矫正，标刻的图像能很好地表现原图像的信息，且实现算法简单。

2 多灰度标刻算法的研究

2.1 5×5 均匀模板实现多灰度标刻

利用激光标刻图像时，只能通过控制激光器输出与否来标刻图像，这是一个二值问题，正好对应着黑白二值灰度图像中两个像素值——黑色 (RGB(0,0,0))、白色 (RGB(255,255,255))，因此对于黑白图像的激光标刻可直接进行。对于多灰度图像，由于具有中间的灰度级 (其 RGB 值介于 RGB(0,0,

0) 和 RGB(255,255,255) 之间)，必须首先将原图像按照一定的算法转化为伪灰度图像，然后进行标刻。

将一幅图像转化为伪灰度图像常用的方法有 50% 阈值法，模式抖动，误差抖动，Rylander 模式法等。其中前三种方法都是基于“一对一”的原理，即伪灰度图像中的一个点对应于原图像中的一个点，不同的是伪灰度图像中像素点的 RGB 值是根据不同的算法对原图像变换后得到的。采用“一对一”进行激光标刻的优点是标刻速度快，且算法较为简单。其中，模式抖动算法和误差抖动算法实现的伪灰度图像有层次感。但是，图像信息量损失较多，且有明显的模板效应，整体效果不是很理想。图 1(a)~(d) 给出了原图像及用这三种方法标刻后的图像。Rylander 模式法是基于“一对多”原理，也就是在伪灰度图像中用一组像素点表示原图像中的一个像素点，并通过这组像素点中黑色像素点的疏密来表示出整体的灰度效果。这种算法能很好地表现出原图像的灰度级，但 Rylander 模式矩阵是 4×4 矩阵，表达的灰度级较少，原灰度图像信息损失较多，图像层次感不够清晰。

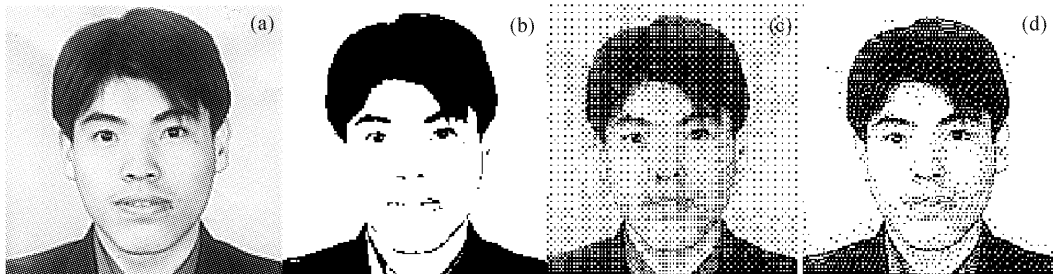


图 1 基于“一对一”原理标刻前后的图像

(a) 原图; (b) 50% 阈值法; (c) 模式抖动法; (d) 误差扩散抖动法

Fig. 1 Laser marked pictures based on “one to one” principle

(a) original picture; (b) 50% threshold; (c) pattern dithering; (d) error-diffusing dithering

1	17	6	15	21
18	19	3	25	12
5	4	2	22	11
14	24	23	16	8
20	13	10	9	7

图 2 均匀分布模板

Fig. 2 Symmetrically distributing template

在实验中，用于激光标刻的算法是基于“一对多”原理，采用 5×5 阵列来生成伪灰度图像，可以表示 26 个灰度级。首先设计 5×5 矩阵模板，元素值为 0 到 24 之间的不重复整数，且在矩阵内空间位置分布是均匀的。模板取值如图 2 所示，称之为均匀

模板，可以保证标刻图像局部和整体的均匀性。由于用于标刻的原图像是 256 色或是真彩色，为了与 5×5 矩阵匹配，首先需要将原图像转换为具有 26 个灰度级的图像。以 BMP 图像为例，分别取出每个像素的 RGB 值，若原图像本身就是灰度图像，则只需要使其 RGB 除以 10，然后取整数部分作为该像素点的灰度值；若原图像不是 256 级的灰度图像，设 Red, Green, Blue 为原图像中红、绿、蓝三基色的值， V_G 为转化后该点的灰度值，则需要按照公式 $V_G = 0.3 \times \text{Red} + 0.59 \times \text{Green} + 0.11 \times \text{Blue}$ 计算出原图像每个像素点对应的 V_G 值，使该像素点 RGB

值中的 Red, Green, Blue 分量都等于 V_G , 这样就把原图像转化为 256 级灰度图像, 然后再把得到的灰度值 V_G 除以 10, 取整数部分作为该像素点的灰度值, 则原图像转化为具有 26 个灰度级的灰度图像。图 3 给出原图像和转换后图像的灰度直方图, 可以看出两直方图中的灰度分布基本相同, 因此原图像的主要信息被很好地保存下来。将转换后具有 26 个灰度级图像中每个像素点的灰度值与 5×5 模板

中的 25 个矩阵元分别作比较, 若该像素的灰度值小于或等于模板中矩阵元的值, 则把该矩阵元置为 0, 否则, 置为 1。当该像素点的灰度值与模板中的 25 个矩阵元全部比较完毕后, 该点的灰度信息就被转化成为只含有 0, 1 两种数值的 5×5 阵列。最后遍历图像中每一个像素点生成伪灰度图像文件, 它可以直接作为激光器出光和关光指令控制激光器的输出进行图像标刻。

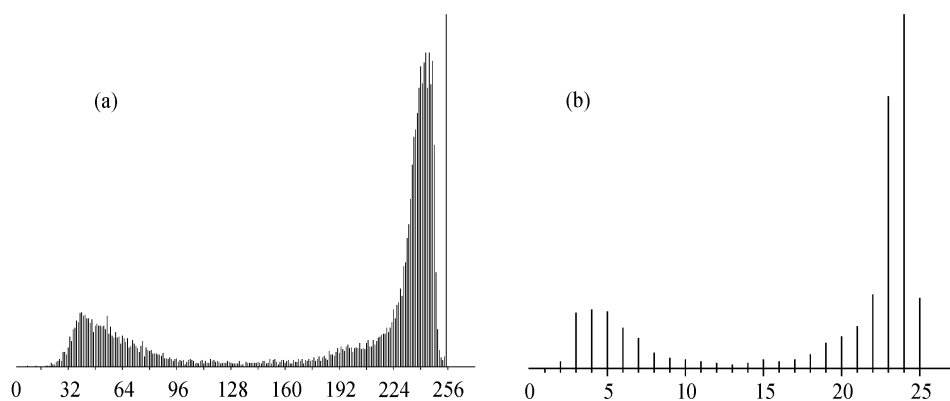


图 3 转化前后具有 256 灰度级和 26 灰度级图像的灰度直方图

(a) 原图像的灰度直方图; (b) 转换后图像的灰度直方图

Fig. 3 Contrast of gray histogram

(a) before conversion, 256 gray grades; (b) after conversion, 26 gray grades

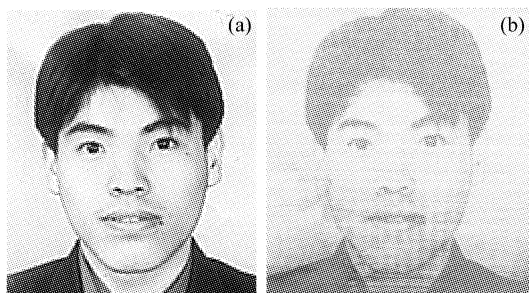


图 4 原图(a)与 5×5 模板匹配后(b)图像对比

Fig. 4 Comparison between (a) the original picture and (b) the picture marked by laser with 5×5 symmetrically distributing template

图 4 给出了原图像和采用了均匀分布 5×5 模板进行激光标刻后的图像, 可以看出, 标刻后的图像很好地保留了原图像的信息。均匀分布的 5×5 模板匹配方法, 相对于前面所讲的 50% 阈值法、模式抖动、误差抖动等方法, 标刻图像的质量有明显的改善, 图像表现的灰度级丰富, 标刻的图像更逼真, 具有层次感。

2.2 5×5 自适应纹理模板算法

5×5 均匀模板匹配算法虽然能较好地表现原

图像信息, 但没考虑相邻像素点的灰度关系, 用一个固定的模板生成伪灰度图像。因此, 标刻后的图像明显带有模板痕迹。 5×5 自适应纹理模板正是基于上述考虑, 整幅图像不是采用固定模板, 而是根据相邻像素的灰度关系, 用差分方法提取图像各部分的纹理特征, 并据此选择匹配模板, 达到好的视觉效果。

原图像中相邻区域内灰度差异在不同方向上是不同的, 即在图像局部区域存在纹理。在这里, 定义纹理方向是灰度值差异最小的方向。图像中的每个像素点(边沿点除外)相邻点有 8 个, 差分运算分别在垂直, 水平, 负 45° , 正 45° 4 个方向上进行。判断灰度值在 4 个方向的差异, 提取该像素点局域内的纹理特征, 并据此来选择模板。为了实现局域平均效果, 用于差分运算的数据点为 3×3 窗口包含的 9 个点, 图 5 是垂直和正 45° 两个方向差分运算的示意图。

垂直, 水平, 负 45° , 正 45° 方向差分运算的数值分别用 D_{ud} , D_{lr} , D_{lu} 和 D_{ru} 来表示。假设中心点的坐标为 (i, j) , 则 3×3 窗口内各数据点坐标分别为

$$\left\{ \begin{array}{ccc} i-1, j-1 & i-1, j & i-1, j+1 \\ i, j-1 & i, j & i, j+1 \\ i+1, j-1 & i+1, j & i+1, j+1 \end{array} \right\}, \text{用 } g(i, j) \text{ 来}$$

表示像素点 (i, j) 的灰度值。对于垂直方向的差分运算, 相当于 3×3 窗口整体向上移动一行, 移动后的 3×3 窗口与原来的 3×3 窗口有 6 个数据相互重叠, 如图 5(a) 所示。则在垂直方向差分运算的值 $D_{ud} = \frac{1}{6} \sum_{m=0,1n=-1,0,1} |g(i+m, j+n) - g(i+m-1, j+n)|^2$ 。同样, 水平方向差分运算具有类似的表达式, 可以求出 D_{lr} 。对于正 45° 方向差分, 相当于 3×3 窗口整体向右移动一列且向上移动一行, 最后两个 3×3 的窗口有 4 个数据相互重叠, 如图 5(b), 差分运算的值 $D_{ru} = \frac{1}{4} \sum_{m=0,1n=0,1} |g(i-m+1, j+n-1) - g(i-m, j+n)|^2$ 。用同样的方法, 可以求出 D_{lu} 。比较 D_{ud}, D_{lr}, D_{ru} 和 D_{lu} 的值, 得出 3×3 窗口中的纹理方向, 并据此选择不同的模板。图 6 给出了相应的 4 个模板。若 D_{ud} 最小, 选取模板(a)匹配; 若 D_{lr} 最小, 选取模板(b)匹配; 若 D_{lu} 最小, 选取模板(c)匹配; 若 D_{ru} 最小, 选取模板(d)匹配。若 D_{ud}, D_{lr}, D_{ru} 和 D_{lu} 的值相同, 选择图 2 给出的均匀模板匹配。

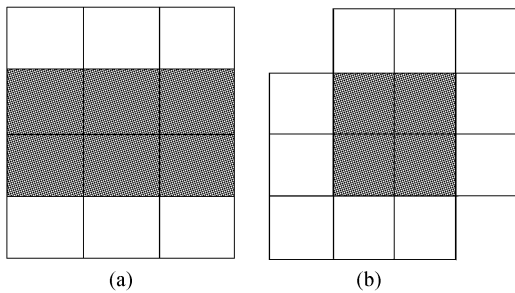


图 5 垂直(a)和正 45° (b)方向差分运算示意图
Fig. 5 Sketch of difference calculation in (a) vertical and (b) right- 45° directions

0	5	10	15	20
1	6	11	16	21
2	7	12	17	22
3	8	13	18	23
4	9	14	19	24

(a)

0	1	2	3	4
5	6	7	8	9
10	11	12	13	14
15	16	17	18	19
20	21	22	23	24

(b)

0	9	16	21	24
8	1	10	17	22
15	7	2	11	18
20	14	6	3	12
23	19	13	5	4

(c)

23	21	15	8	0
19	14	7	1	9
13	6	2	10	18
5	3	11	17	22
4	12	10	21	24

(d)

图 6 自适应纹理模板图
Fig. 6 Self-adapt texture templates

利用 5×5 模板将原图像转化为伪灰度图像的

方法如前所述。为了防止图像的灰度跳变, 对每个像素点都采取上述算法处理, 并把每个像素都作为 3×3 模块的中心点, 然后按照上述算法进行纹理判断, 选择匹配模板。对于图像的边缘, 用图 2 给出的均匀分布 5×5 模板进行匹配。图 7 给出了利用统一模板和自适应纹理模板标刻的图像。可以看出, 虽然图 7(a), (b) 的灰度级没有变化, 但图 (b) 中无明显的模板痕迹, 纹理表现清晰, 实际标刻效果好。

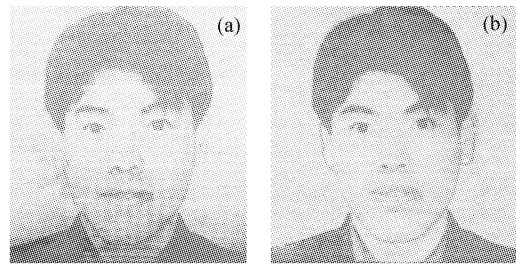


图 7 用 5×5 统一模板(a)与 5×5 自适应纹理模板(b)标刻的图像
Fig. 7 Laser marking pictures with (a) 5×5 symmetrically distributing template and (b) 5×5 self-adapt templates

3 拉格朗日二次抛物线插值矫正法

目前, 大部分激光标刻系统利用振镜偏转来实现图像扫描。由于振镜偏转的非线性, 对于较大图像, 标刻图像存在桶形或枕形失真, 因此必须在标刻前对驱动振镜偏转的数据进行处理, 使标刻后的图像尽可能消除失真影响。文献[5]详细地讲述了用振镜偏转来标刻图像时造成图像失真的原因及其相应的矫正方法, 但矫正的方法较复杂。在实验中, 采用拉格朗日二次抛物线插值法对图像进行矫正, 方法简单, 且效果较好。

在实际的激光标刻中, 为了减少因振镜偏转扫描引起输出图形几何畸变的影响, 常选择对称偏转扫描, 两个垂直扫描方向对称线的交点正好对应着输出图像的中心。图 8 给出了利用双振镜扫描所引起的输出图像几何畸变示意图。显然, 图像的中心位置不存在畸变, 以此作为坐标系的原点。实线正方形表示理想的没有畸变的输出图形, 虚线表示的是由于双振镜扫描产生畸变后的输出图形。在标刻图像时, 理想点的位置坐标为 (x_0, y_0) , 实际输出点的坐标为 $(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)$ 。可以看出, $x = 0$ 和 $y = 0$ 两条线上的点畸变量近似为 0, x 和 y 方向几何畸变呈相反弯曲方向(x 方向出现枕形失真, y 方向出

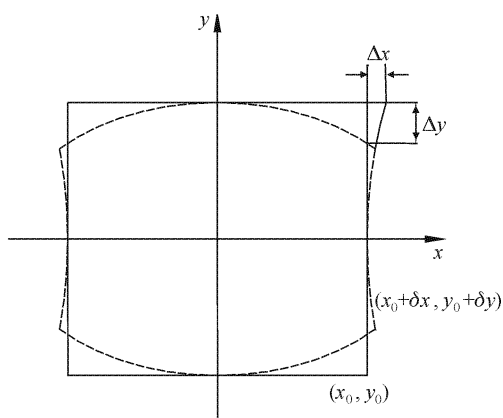


图 8 振镜偏扫描畸变示意图

Fig. 8 Schematic drawing of distortion caused by dual galvanometer scanning during the laser marking

现桶形失真),且在 y 方向的最大畸变量 $|\Delta y|$ 大于 x 方向上的最大畸变量 $|\Delta x|$ ^[5]。为了减少图形的几何畸变,必须对激光标刻时输出位置坐标进行矫正。位置坐标用对该位置进行标刻时偏转振镜所需要的输出脉冲数目来表示。对于 12 位 D/A 转换卡,引起振镜偏转的输出脉冲数目为 4096。对于图像上边沿,理想输出位置是一条直线,在目前的坐标系下,该直线方程为 $y = 2048$,实际输出位置近似为一条抛物线。由于振镜偏转的对称性,抛物线的方程可表示为 $y = k_y x^2 + 2048$,不含 x 的一次方项。由上面的分析可知,抛物线上三个已知点的坐标分别为 $(-2048, 2048 + \Delta y)$, $(0, 2048)$, $(2048, 2048 + \Delta y)$,根据拉格朗日二次抛物线插值的方法,可得 $k_y = \frac{\Delta y}{2048^2}$,所以插值多项式为 $y = \frac{\Delta y}{2048^2} x^2 + 2048$ 。因此对于图像上边沿位置坐标的矫正方程近似为 $y = \frac{-\Delta y}{2048^2} x^2 + 2048$ 。图像下边沿位置坐标的矫正方程近似为 $y = \frac{\Delta y}{2048^2} x^2 - 2048$ 。同样,图像最左边和最右边数据点位置坐标的矫正公式分别为 $x = \frac{\Delta x}{2048^2} y^2 - 2048$, $x = \frac{-\Delta x}{2048^2} y^2 + 2048$ 。从图 8 可以看出,在 y 方向,越往图像的中心处,畸变量越小,当 $y = 0$ 时,畸变量为 $\delta y = 0$ 。因此,对于整幅图像的矫正, Δy , Δx 分别用 $S_y = \Delta y \times \frac{y}{2048}$, $S_x = \Delta x \times \frac{x}{2048}$ 代替。图 9 给出了利用振镜扫描直接标刻图像(a)和对输出点位置坐标矫正后标刻的图像(b),图像的幅面

均为 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$,采用自适应纹理模板匹配。可以看出图像(a)边沿明显存在着失真,上下边沿的弯曲方向相对,左右边沿的弯曲方向相背。图像(b)边沿失真明显减少,四个边沿基本上为一条直线。矫正公式中 x 方向和 y 方向的最大畸变量 $|\Delta x|$, $|\Delta y|$ 由实验测定。多次实验表明,取 $|\Delta y| = 90$, $|\Delta x| = 80$,输出图像基本上消除失真影响。

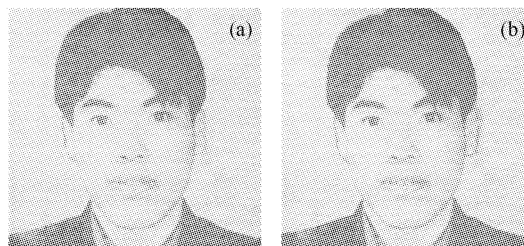


图 9 激光标刻输出图像

(a) 未矫正; (b) 矫正

Fig. 9 Picture marked by laser with self-adapt templates

(a) uncorrected; (b) corrected

4 结 论

利用 5×5 均匀匹配模板实现了多灰度图像的标刻,相对于 50% 阈值法、模式抖动等方法图像的标刻质量得到了明显改善。考虑到相邻像素点的灰度关系,利用差分方法提取图像各部分的纹理特征,并据此选择自适应纹理模板进行多灰度图像的标刻,使激光标刻的图像基本上无明显的模板痕迹,图像层次分明,灰度级表现清晰。用拉格朗日二次抛物线插值方法对输出图像的位置坐标进行矫正后,输出图像基本上消除了因振镜扫描引起的几何畸变的影响,图像质量得到了进一步提高。

参 考 文 献

- 1 T. W. Ng, S. C. Yeo. Aesthetic laser marking assessment using luminance ratios [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(3):177~186
- 2 A. A. Peligrad, E. Zhou, D. Morton et al.. Dynamic models relating processing parameters and melt track width during laser marking of clay tiles [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(2):115~123
- 3 T. W. Ng, S. C. Yeo. Aesthetic laser marking assessment using spectrophotometers [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **104**(3):280~283
- 4 D. R. Alexander, M.-S. Khelif. Laser marking using organo-metallic films [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1996, **25**(1):55~70
- 5 Yu Xiaoshun. Distortion correction for dual galvanometer scanning [J]. *Laser & Infrared*, 1998, **28**(1):45~47
虞孝舜. 双振镜扫描几何畸变的校正[J]. *激光与红外*, 1998, **28**(1):45~47