

应用于条纹中心提取的非对称条纹调整方法

李程辉, 张英杰, 韩江涛, 张佳瑞

西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

摘要 针对结构光测量中条纹灰度非对称分布使条纹中心提取精度降低的问题, 提出了一种应用于条纹中心提取的条纹灰度非对称调整方法。首先对初始灰度进行幂运算, 将初始灰度和幂运算结果相减, 并对相减结果进行灰度补偿, 然后利用补偿后的灰度再进行迭代, 直至满足迭代终止条件。此外, 分析了条纹灰度非对称分布的影响因素, 提出了条纹灰度分布的评价参数, 并对所提方法进行了实验验证。实验结果表明, 该方法可以根据条纹灰度的初始分布情况对条纹灰度进行有效调整, 迭代结果突出了最大值附近的灰度信息, 降低了灰度非对称分布对条纹中心提取的影响, 提高了条纹中心提取的精度。上述结果验证了该方法的有效性和可靠性。

关键词 测量; 条纹中心; 迭代调整; 灰度分布; 非对称

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0504005

Asymmetric Stripe Adjustment Method for Stripe Center Extraction

Li Chenghui, Zhang Yingjie, Han Jiangtao, Zhang Jiarui

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract A method of stripe gray-scale asymmetry adjustment for strip center extraction is proposed to solve the problem that stripe gray-scale asymmetric distribution degrades the accuracy of stripe center extraction in the structured light measurement. Firstly, the exponentiation of initial gray-scale is obtained. The initial gray-scale is subtracted from exponential calculation result, and the subtraction result is gray-compensated. Then, the gray-scale after compensation is used to iterate until the iteration termination conditions are satisfied. Moreover, the factors that affect the asymmetry of stripe gray-scale distribution are analyzed, and the evaluation parameter of the stripe gray-scale distribution is put forward. Experiments are conducted to verify the proposed method. The results show that the algorithm can effectively adjust the stripe gray-scale according to the initial gray-scale distribution. The iteration result highlights the gray information around the maximum value, reduces the impact of gray-scale asymmetric distribution on stripe center extraction, and improves the accuracy of stripe center extraction. Based on these results, the validity and reliability of this method are verified.

Key words measurement; stripe center; iterative adjustment; gray-scale distribution; asymmetry

OCIS codes 120.2650; 150.0155; 100.3008; 120.6650

1 引 言

结构光测量技术是一种主动式的非接触测量方法, 具有测量设备简单、速度快以及精度高等特点, 近年来该技术在逆向工程、在线测量、故障缺陷检测以及考古学等方面得到广泛应用^[1-3]。

结构光投影图像的特征主要有圆点、棋盘格、条纹以及颜色等。在进行图像处理的过程中, 相较于其他特征, 条纹中心的提取抗噪性能较好, 对图像质量要求低, 因此被广泛应用在结构光系统中^[4-5], 条纹中心的快速准确提取也成为结构光测量的关键技术之一^[6]。目前, 常用的条纹中心提取方法包括极值法、曲线拟合

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51375377)

作者简介: 李程辉(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: 825047641@qq.com

导师简介: 张英杰(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事点云处理、光学测量方面的研究。

E-mail: yjzhang@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

法、几何中心法、灰度重心法^[7]和 Steger 方法^[8]等。极值法和几何中心法容易受到噪声的干扰,曲线拟合法、灰度重心法和 Steger 方法是以条纹的灰度分布为基础,如果条纹的灰度分布发生非对称退化,其提取精度势必降低^[9]。因此,降低条纹非对称分布的程度有利于提高条纹中心的提取精度。

目前,有部分学者对条纹提取过程中条纹灰度的非对称分布进行了研究。Steger^[8]提出利用条纹轮廓的非对称模型来解决灰度非对称分布的问题,但其模型有一定针对性,适用范围较窄。Xue 等^[10]建立了拍摄条纹灰度分布模型,分析了影响条纹灰度分布的因素,提出了条纹质量的评价参数和剔除标准,但是并没有对条纹灰度的非对称分布进行处理和优化。刘振等^[11]提出利用邻域条纹的相关性建立相关系数来解决灰度分布畸变的问题,但其对灰度非对称程度较大的条纹提取效果不佳,且相关系数的计算比较复杂。周兴敏等^[12]提出一种基于双三角光路的投影光束反射光斑重心偏移的修正方法,但其系统模型复杂。崔希君等^[13]提出了一种基于幂运算的自适应迭代方法计算条纹中心的坐标,这种方法在一定程度上降低了条纹灰度非对称分布对条纹中心提取的影响,但其提取结果会受到噪声影响,且容易造成条纹原有灰度分布信息的丢失。

本文提出了一种应用于条纹中心提取的非对称条纹灰度调整方法。所提方法首先对条纹灰度进行幂运算,再将初始灰度和幂运算结果做减法运算,并对相减结果进行灰度调整补偿,防止灰度值的迅速衰减;然后利用补偿后的灰度再进行迭代,从而实现了对非对称条纹的调整和优化。迭代过程充分利用了原有的灰度分布信息,实现了对非对称条纹灰度不同程度的调整,突出了条纹最大值附近的灰度信息,减小了条纹中心提取受灰度非对称分布影响的程度。

2 方法描述

2.1 条纹灰度分布的分析

结构光条纹中心提取依赖于条纹灰度的分布特征。条纹灰度的分布受到多种因素的影响,包括被测物的表面特征、投射和拍摄角度、环境噪声以及图像采集系统等^[14]。图像采集系统对条纹灰度分布的影响主要体现在量化误差和电荷耦合器件(CCD)内部噪声,包括光子噪声、散粒噪声、暗流噪声等^[15],其表现形式主要为高斯噪声和椒盐噪声,可以利用高斯滤波、中值滤波等方法来对该类噪声进行处理^[16]。环境噪声主要为环境光引起的随机噪声,可以通过背景相减法来消除,也可以通过提高采集图像的信噪比来降低随机噪声的影响。物体的表面特征、投射和拍摄角度受到测量系统本身的限制,有时很难做出调整,当条纹投射到物体表面的特殊位置时,条纹灰度的分布将受到显著影响。

物体表面法向发生突变时,图像采集模型简化后如图 1 所示。对应不同表面,法线分别为 N_1 和 N_2 ,镜面反射方向为 R_1 和 R_2 ,入射光线分别为 I_{i1} 和 I_{i2} ,摄像机拍摄光线分别为 I_{o1} 和 I_{o2} , θ_1 、 θ_2 为入射角, β 为投射方向和拍摄方向的夹角, φ 为物体相邻表面的夹角。

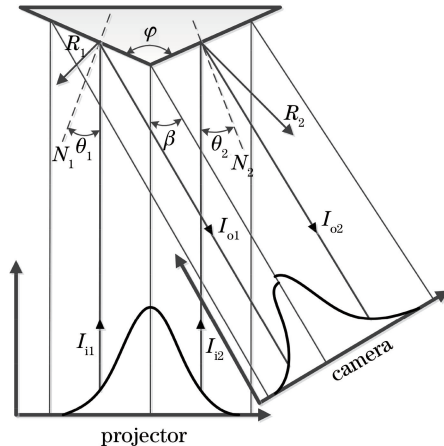


图 1 表面法向突变对条纹灰度分布的影响

Fig. 1 Influence of surface normal mutation on the stripe gray-scale distribution

在不考虑噪声影响的条件下,根据 Phong 光照模型^[17-18],摄像机接收到来自物体表面的反射光强 I_o 。为环境反射光 I_e 、入射光源的漫反射光 I_d 和入射光源的镜面反射光 I_s 之和,即:

$$I_o = I_e + I_d + I_s \quad (1)$$

但是如果入射方向和拍摄方向位于法向 N 同侧,则表面显示中不会有镜面反射效果^[18]。所以,对于图 1 所示模型有:

$$I_{o1} = I_{e1} + I_{d1} = I_a K_a + I_{i1} K_d \cos \theta_1, \quad (2)$$

$$I_{o2} = I_{e2} + I_{d2} + I_{s2} = I_a K_a + I_{i2} K_d \cos \theta_2 + I_{i2} K_s \cos^n(2\theta_2 - \beta), \quad (3)$$

式中 I_a 为环境光的光强, K_a 为物体对环境光的反射系数, K_d 为物体表面的漫反射率, K_s 为物体表面的镜面反射率; n 为反应物体表面光滑程度的高光指数,表面越光滑,高光指数越大。

由分析可知,对于材质相同的表面,物体表面法向的变化会导致入射角 θ 以及拍摄方向和反射方向夹角的变化,进而导致入射光线的漫反射光强和镜面反射光强发生变化,所以摄像机接收到的光强分布发生了非对称退化。当遇到物体表面反射率突变、表面不连续以及边缘时,条纹灰度的分布会发生严重退化,如图 2 所示。相比于表面的反射率变化,表面不连续以及边缘对条纹灰度分布的影响更明显,从广义范围来看,这种表面不连续和边缘可以看成物体的表面反射率接近为零。

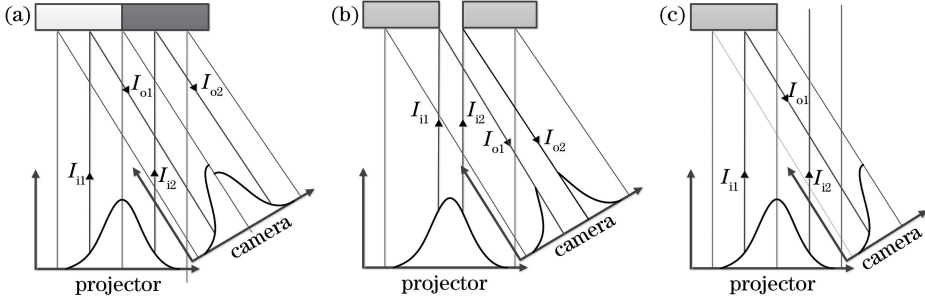


图 2 物体表面特征对条纹灰度分布的影响。(a)反射率突变的影响;(b)表面不连续的影响;(c)边缘的影响

Fig. 2 Influence of surface characteristics on stripe gray-scale distribution. (a) Influence of reflectivity mutations; (b) influence of surface discontinuity; (c) influence of edges

2.2 条纹非对称分布的评价参数

从图 1 和图 2 的分析可知,由于物体表面法向、反射率以及投射与拍摄角度的变化,条纹的灰度分布会发生不同程度的非对称退化。为了便于分析和比较,需要对条纹截面灰度非对称分布的程度进行描述,本研究提出利用非对称指数 D 作为评价参数。

某一图像条纹截面的灰度分布如图 3 所示,以此来分析非对称指数 D 。其求取步骤为:

1) 取不同灰度值的截线与灰度分布曲线相交,本例中灰度间隔为 25,间隔越小,则截面越多,越能准确评价条纹灰度的分布状况,相应的计算量也会增加。设共有截线 N_L 条,可分别获得 N_L 组对应的左右交点 P_{Li} 和 P_{Ri} ,其中 $i = 1, 2, \dots, N_L$ 。

2) 分别求得左右交点对应的中心点 P_{Mi} 。

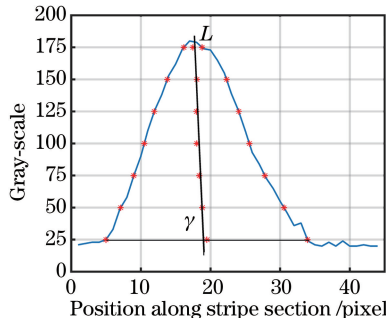


图 3 条纹截面灰度分布非对称指数 D 的确定

Fig. 3 Determination of asymmetry index D of stripe section gray-scale distribution

- 3) 以 P_{Mi} 作为参考点,用最小二乘法求得拟合直线 L 。
- 4) 计算拟合直线 L 和灰度截线的夹角 $\gamma, \gamma \in (0, \pi/2)$ 。
- 5) 非对称指数 D 定义为

$$D = 90 - \gamma. \quad (4)$$

从(4)式中的可以看出,非对称指数 D 描述的是条纹整体的灰度分布相对条纹方向的偏离程度。利用图 1 所示模型获得不同的条纹截面,并计算非对称指数,其结果如图 4 所示。

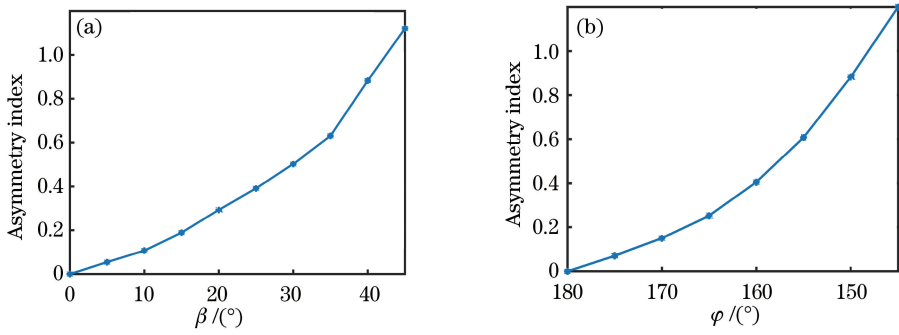


图 4 非对称指数对不同条纹截面的评价。(a) $\varphi=150^\circ$ 时,不同 β 确定的条纹截面的非对称指数;
(b) $\beta=40^\circ$ 时,不同 φ 确定的条纹截面的非对称指数

Fig. 4 Evaluations of different stripe sections by asymmetric index. (a) Asymmetric indexes of stripe sections determined by different β while $\varphi=150^\circ$; (b) asymmetric indexes of stripe sections determined by different φ while $\beta=40^\circ$

由图 4 可以看出,在图 1 所示模型中,通过调整 β 和 φ 获得了非对称程度不同的条纹截面。当 $\beta=0^\circ$ 或 $\varphi=180^\circ$ 时,条纹灰度分布对称,其对应的非对称指数 D 为零;随着 β 的增大或 φ 的减小,条纹灰度分布非对称程度增大,其非对称指数 D 也随之增大。因此,非对称指数 D 可以有效地评价条纹灰度分布的非对称程度。

2.3 非对称条纹灰度调整方法

尽管拍摄图像的条纹灰度分布会受到多种因素的影响,但在没有高光和噪声的情况下,对于正弦和高斯分布的条纹,拍摄图像的条纹中心一般为条纹灰度的最大值位置。事实上,由于拍摄过程中噪声的存在,最大值的位置可能发生偏移,甚至出现多个最大值,所以仅仅根据最大值确定的条纹中心精度较低。值得注意的是,较于条纹边缘,条纹中心附近具有较高的灰度,且高灰度部分具有更强的抗噪能力,所以本研究首先对条纹灰度进行调整,突出最大灰度附近的灰度信息,再进行条纹中心的提取。

对于两个大于 1 的不同正数 A 和 B ,设 $A > B$,对两数同时进行幂运算得 A^m 和 B^m 。当 $0 < m < 1$ 时,有:

$$\frac{A - A^m}{B - B^m} > \frac{A}{B}, \quad (5)$$

也就是说,当 $0 < m < 1$ 时,将条纹截面的所有灰度值与其对应的幂运算结果相减,相当于提高了条纹中心附近高灰度部分的权重,降低了条纹边缘低灰度部分的权重。当一次计算对不同灰度值的改变不明显时,需要进行多次迭代,然而每次计算后条纹的灰度会衰减,为了充分利用初始的灰度分布信息,并保留初始的灰度分布特征,每次计算后还要对灰度进行补偿。

基于上述思路,本研究提出了应用于条纹中心提取的灰度非对称调整方法,灰度调整时每次迭代幂运算相减和灰度补偿交替进行,其具体步骤为:

1) 利用非对称指数 D 对条纹灰度分布的非对称程度进行评价,判断是否需要进行迭代,当 D 大于某一阈值时,迭代开始。

2) 对条纹灰度进行幂运算,设 $I(x)$ 为初始灰度分布,幂运算后的灰度分布为 $g(x)$,则有:

$$g(x) = [I(x)]^m, \quad (6)$$

式中 m 为幂指数,且 $0 < m < 1$ 。幂指数 m 决定了灰度的再分布, m 过小则会降低每次运算对灰度的调整能力,而较大的 m 会造成条纹截面灰度分布信息的丢失。因此,幂指数对最后的迭代调整结果至关重要。

3) 用 $g(x)$ 对初始灰度分布进行调整:

$$f(x) = I(x) - g(x), \quad (7)$$

$$h(x) = (g_{\max} - g_{\min}) \frac{f(x) - g_{\min,m}}{g_{\max,m} - g_{\min,m}} + g_{\min}, \quad (8)$$

式中 g_{\max} 和 g_{\min} 分别为初始灰度 $I(x)$ 的最大灰度值和最小灰度值, $g_{\max,m}$ 和 $g_{\min,m}$ 分别为 $f(x)$ 中的最大灰度值和最小灰度值, $h(x)$ 为对灰度非对称分布一次迭代后的结果。

4) 判断是否满足迭代终止条件。迭代终止条件有两个:一是两次迭代后计算的条纹中心位置差值小于某一临界值,二是迭代次数超过某一预定值。若满足迭代终止条件,退出循环;否则,重复步骤 2)和 3),直至满足迭代终止条件。

3 仿真及实验分析

为了验证方法的有效性,利用一个石膏圆球进行了实验。实验系统包含一个数字光处理(DLP)投影仪(Optoma DN322,分辨率为 1024 pixel×768 pixel)、一个摄像机(Point Grey GX-FW-28S5C/M-C CCD,分辨率设置为 1600 pixel×1200 pixel)和一台计算机(Inter i5-4460,CPU 为 3.20 GHz,内存为 8 GB)。图 5 给出了拍摄图像中具有代表性的条纹。

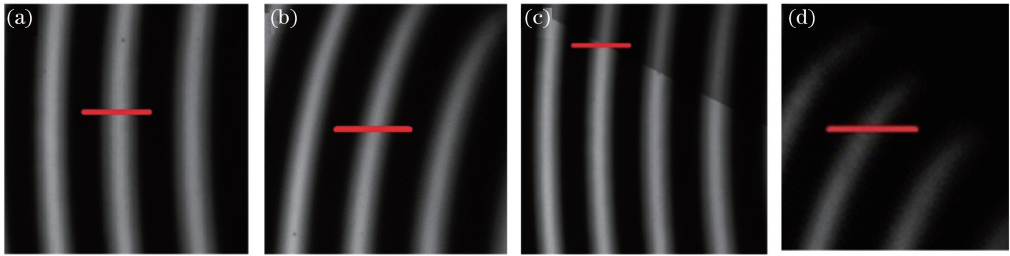


图 5 拍摄图像中的代表性条纹。(a)正常条纹;(b)非对称条纹;(c)反射率突变处条纹;(d)低亮度条纹

Fig. 5 Representative stripes in the image. (a) Normal stripe; (b) asymmetric stripe; (c) reflectivity-mutating stripe; (d) low brightness stripe

3.1 算法中参数的确定

为了分析算法中各参数对条纹灰度调整程度以及条纹中心位置的影响,对图 5 中各条纹红线标记处截面的灰度分布进行了分析和计算。迭代次数为 1 时幂指数对条纹灰度分布的影响如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,迭代调整前后的条纹中心位置差随着幂指数的增大而增加,即幂指数越大,一次迭代对条纹灰度非对称分布的调整能力越强。由于幂运算后需要做相减运算,较大的幂指数会造成灰度分布信息的丢失,所以幂指数并非越大越好。图 6(b)中 4 种条纹的非对称度指数曲线呈现先减后增的趋势,且取得最小值时幂指数的取值非常接近,均在(0.7,0.8)范围内。这主要是因为:当灰度值均大于 1,且幂指数在(0,1)的范围时,在幂运算相减的过程中,较小的幂指数主要对低灰度值起作用,并且幂指数越大对低灰度区域的非对称程度调整越明显;当幂指数继续增大时,较大的幂指数对高灰度的作用程度增大,导致低灰度的不对称性又突显出来。由于图 5 中的条纹包括了结构光图像中常见的条纹形式且具有一定的代表性,同时为了使每次

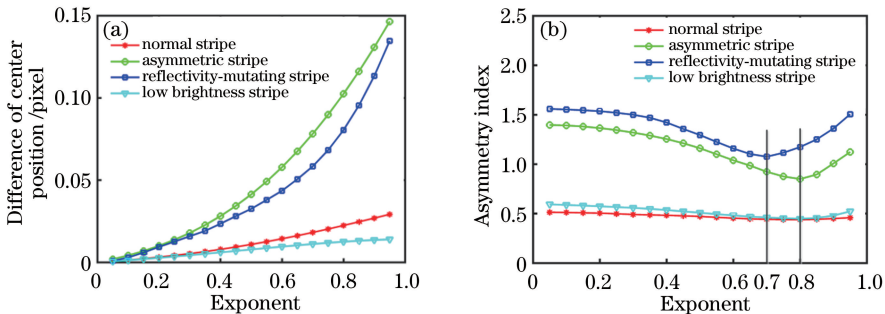


图 6 幂指数对条纹灰度分布的影响。(a)迭代调整前后的中心位置差;(b)非对称指数

Fig. 6 Influence of power exponent on stripe gray-scale distribution. (a) Difference of center positions before and after the iteration adjustment; (b) asymmetry index

运算的结果兼具较大的灰度调整程度和较小的非对称性,因此迭代过程中幂指数取 0.7。

幂指数为 0.7 时,迭代次数对条纹灰度分布的影响如图 7 所示。从图中可以看出,开始计算时相邻两次迭代调整条纹中心位置差和非对称指数迅速减小,随着迭代次数的增加,每次迭代对条纹灰度分布的调整能力逐渐下降。图 7 表明,当迭代次数大于 10 时,条纹中心位置差曲线和非对称指数曲线趋于平缓,即条纹中心逐渐趋于稳定。综合考虑计算结果和效率,可以将最大迭代次数为 10 作为迭代终止条件。由图 7(a)可见,当相邻两次迭代调整的条纹中心位置差小于 0.01 pixel 时,继续迭代的位置差值变化并不明显,同时考虑到像素的尺寸以及条纹提取精度,可以将大小为 0.01 pixel 的相邻两次迭代条纹中心位置差作为迭代终止条件。观察图 7(b),正常条纹和低灰度条纹的非对称指数约为 0.5,非对称条纹和反射率突变条纹的非对称指数较高,经过 10~15 次迭代调整后,4 种条纹的非对称指数均小于 0.3。为了提高算法对不同条纹的适用性并提高灰度调整能力,可以将初始时非对称指数是否大于 0.4 作为迭代是否进行的判断条件。

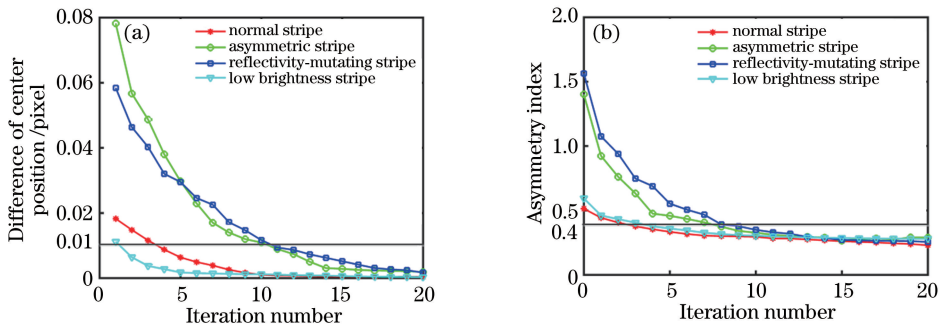


图 7 迭代次数对条纹灰度分布的影响。(a)迭代调整前后的中心位置差;(b)非对称指数

Fig. 7 Influence of iteration number on stripe gray-scale distribution. (a) Difference of center positions before and after the iteration adjustment; (b) asymmetry index

3.2 灰度调整的实验及仿真分析

针对图 5 中具有代表性的条纹,取红线标记处的条纹截面进行分析,其初始灰度分布及迭代调整后的灰度分布如图 8 所示。

表 1 给出了图 8 中各条纹灰度分布的评价参数及迭代前后利用灰度重心法提取的条纹中心坐标。图 8

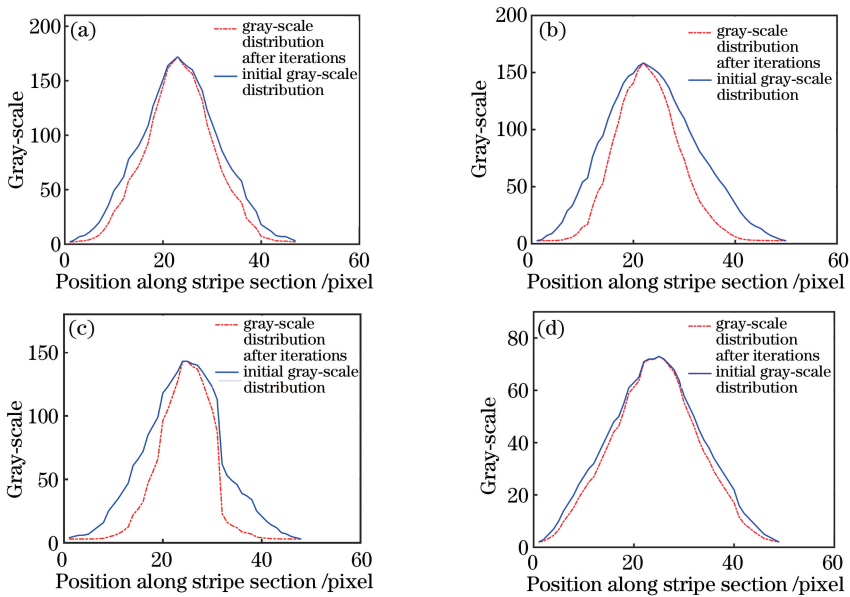


图 8 条纹截面初始及迭代后的灰度分布。(a)正常条纹;(b)非对称条纹;(c)反射率突变处条纹;(d)低亮度条纹

Fig. 8 Initial and iterated gray-scale distribution of stripe section. (a) Normal stripe; (b) asymmetric stripe; (c) reflectivity-mutating stripe; (d) low brightness stripe

(a)所示正常条纹的非对称指数较小,迭代两次即满足迭代终止条件,迭代调整前后条纹中心位置的变化较小。图 8(b)所示条纹的灰度受到物体表面法向变化以及投射和拍摄角度的影响,发生了非对称分布,有较高的非对称指数。在图 8(b)中条纹两侧边缘灰度非对称明显,迭代调整后其灰度值变小,条纹截面灰度分布的非对称程度减小,条纹的能量集中在最大灰度值附近,条纹中心也向能量集中的方向移动。图 8(c)所示的条纹受到反射率突变的影响,其灰度出现了阶跃式的变化,非对称指数较大。迭代调整后,其非对称指数降低,灰度分布受到反射率突变的影响程度减小,条纹中心提取时主要利用高灰度部分,可以提高条纹中心提取精度。图 8(d)所示的条纹较暗,其平均灰度较低,容易受到随机噪声的影响,由于灰度分布对称,非对称指数较小,迭代调整效果不明显。上述分析可以看出,本研究提出的调整算法可以对条纹截面灰度的非对称分布进行有效调整。同时,由于迭代过程充分利用了原有的灰度分布信息,每次幂运算相减后又对灰度进行补偿,所以灰度调整结果保留了原有的灰度分布特征。

表 1 图 8 中各条纹截面的参数

Table 1 Parameters of the stripe sections in Fig. 8

Parameter	Normal stripe	Asymmetric stripe	Reflectivity-mutating stripe	Low brightness stripe
Iterations number	2	10	10	1
D before iterations	0.5145	1.4022	1.5612	0.5926
D after iterations	0.4063	0.3276	0.3502	0.4618
Coordinates of initial stripe centers /pixel	23.4821	23.7198	24.3156	24.3109
Coordinates of stripe centers after iterations /pixel	23.4491	23.1295	24.6383	24.3499

为了验证本算法对条纹中心提取结果的影响,利用图 1 所示的模型进行了仿真实验。仿真过程中取 $K_d=0.8, K_s=0.2, n=128$,其余参数如表 2 所示,两次仿真获得的灰度图像如图 9 所示,灰度调整前后条纹中心的提取采用灰度重心法。

表 2 条纹灰度调整的仿真条件及结果

Table 2 Simulation conditions and results of stripe gray-scale adjustment

Parameter	Simulation 1	Simulation 2
$\beta /(^{\circ})$	40	10
$\varphi /(^{\circ})$	150	150
D before iterations	0.8826	0.1273
D after iterations	0.4354	0.1077
Ideal coordinates /pixel	75	83
Initial coordinates /pixel	77.2536	83.5993
Coordinates after iterations /pixel	76.4638	83.4817

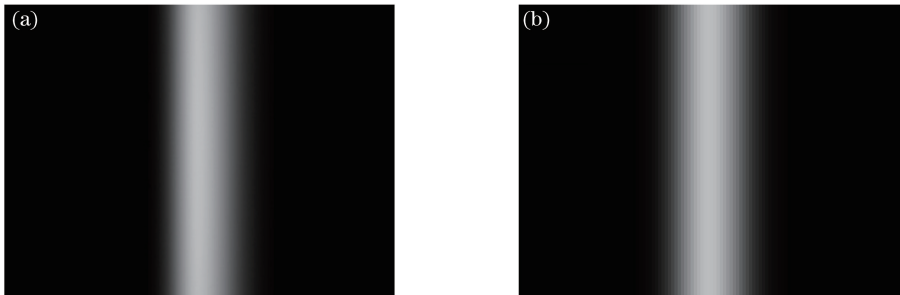


图 9 条纹灰度仿真图像。(a)仿真 1;(b)仿真 2

Fig. 9 Simulation images of stripe gray-scale. (a) Simulation 1; (b) simulation 2

在图 9 中,由于待测物的表面形貌、投射和拍摄角度的影响,仿真 1 的条纹灰度出现了明显的非对称退化,非对称指数较大,初始条纹中心较理想位置有较大误差,经过本算法的灰度调整,非对称指数减小,条纹

中心的提取误差也明显减小。仿真 2 的条纹灰度分布非对称程度较小,算法对灰度的调整程度也较小,条纹中心位置的变化小于仿真 1,其提取精度得到提高。因此,本算法可以根据条纹灰度的非对称程度对灰度分布进行不同程度的迭代调整,减小条纹灰度非对称分布对条纹中心提取结果的影响,提高条纹中心的提取精度。

3.3 算法的稳定性和可靠性验证

为了分析灰度调整算法对图像采集过程中噪声的敏感程度,本研究进行了重复性实验。在相同的采集环境下,连续拍摄 100 幅图像,对不同图像中图 5(b)红线位置的非对称条纹截面灰度进行迭代计算,其中心提取结果的统计分布如图 10(a)所示。从图中可以看出,灰度调整后条纹中心多次提取结果分布在(793.8, 794.2)范围内,总体上服从正态分布,条纹中心坐标的均值为 794.0273 pixel,其标准差为 0.0652 pixel。相同位置未经迭代调整的条纹中心提取结果分布在(794.2, 794.8)范围内,条纹中心坐标的均值为 794.4479 pixel,标准差为 0.1127 pixel。可以看出,迭代后条纹中心提取结果的标准差变小,中心位置移动了 0.42 pixel。对于图 5(a)中的正常条纹,条纹中心统计结果如图 10(b)所示,灰度调整前后条纹中心分布变化不明显,中心位置仅平均移动了 0.0752 pixel。因此,本研究提出的灰度调整算法可以根据初始灰度分布的非对称程度对条纹的灰度进行不同程度的迭代调整,调整后条纹中心坐标分布的标准差减小,验证了算法的稳定性。

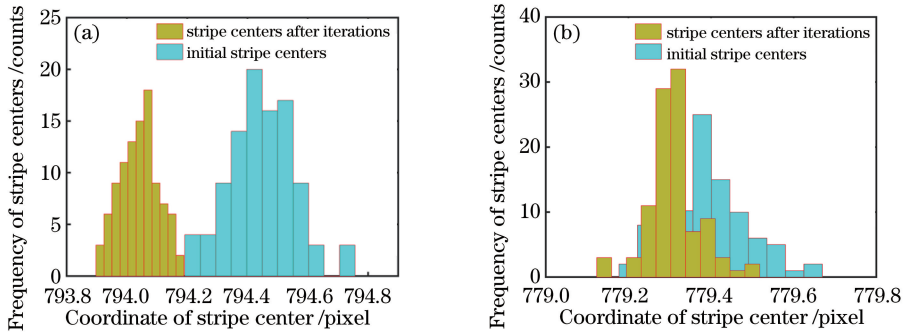


图 10 迭代调整前后条纹中心的分布。(a)非对称条纹;(b)正常条纹

Fig. 10 Distribution of stripe centers before and after iteration adjustment. (a) Asymmetric stripe; (b) normal stripe

此外,为了验证算法的可靠性,以人脸石膏模型进行实验,分别用本算法和文献[13]中的方法对条纹灰度进行调整,灰度调整耗时分别为 0.0746 s 和 0.0385 s,条纹中心提取结果如图 11 所示,红线为利用初始条纹灰度提取的条纹中心,绿线为利用本算法对灰度迭代调整后提取的条纹中心,蓝线是利用文献[13]的方法对灰度调整后提取的条纹中心。在表面法向变化较大的区域,如图 11(a)标记处,提取结果差异明显。对该区域进行放大,如图 11(b)所示,可以观察到投射的条纹发生了明显变形,其宽度增大且灰度分布发生了非对称退化,直接提取的条纹中心受灰度非对称分布的影响偏离了真实中心所在高灰度区域。经过本算法的

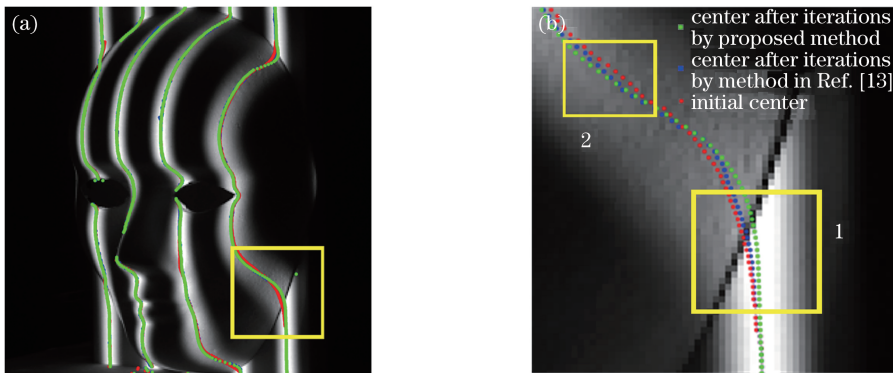


图 11 迭代调整前后条纹中心对比。(a)条纹中心提取结果;(b)(a)图标记位置放大图

Fig. 11 Comparison of stripe centers before and after iteration adjustment. (a) Extracted stripe centers; (b) enlarged image of the marked position in Fig. (a)

灰度迭代调整后,提取的条纹中心稳定在高灰度区域,且与条纹的延伸方向更加吻合,受灰度非对称分布的影响程度较小,这在图 11(b)的标记 1 处尤为明显。经过文献[13]方法的灰度调整,提取的条纹中心较未经迭代调整的中心也有一定程度的改善,但其对灰度非对称分布的调整能力不及本算法,从图 11(b)标记 2 处可以看到提取的条纹中心不平滑,呈现出一定的波动,表明其调整方法容易受到噪声的干扰。通过分析可知,本算法可以对复杂物体图像的条纹进行灰度调整,并减小灰度非对称分布对条纹中心提取的影响,且本方法较文献[13]方法具有明显的优越性,实验结果同时也验证了本方法具有较高的可靠性。

4 结 论

提出了一种对条纹灰度非对称分布进行调整的方法,所提方法根据条纹灰度的初始分布信息,通过幂运算相减和灰度补偿交替迭代对灰度进行调整,使提取的条纹中心向高灰度区域靠近,降低了灰度非对称分布对条纹中心提取的影响,提高了条纹中心提取的可信度。实验结果表明,本方法可以降低条纹中心多次提取的标准差,且在提取过程中增加灰度迭代调整过程对条纹提取效率影响不大,验证了本方法的有效性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] Li Fengjiao, Li Xiaojing, Liu Zhen. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1110002.
李凤娇, 李小菁, 刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1110002.
- [2] Wu Zhiwei. Optical system generating wide measurement area and low divergence degree grating structure light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0908002.
吴志伟. 产生宽测量区域低发散度栅型结构光的光学系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0908002.
- [3] Zhang Y, Wang S, Zhang X, *et al.* Freight train gauge-exceeding detection based on three-dimensional stereo vision measurement[J]. *Machine Vision and Applications*, 2013, 24(3): 461-475.
- [4] Hu Q, Harding K G, Hamilton D. Image bias correction in structured light sensor[C]. *SPIE*, 2004, 5606: 117-123.
- [5] He Junji, Zhang Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(7): 593-597.
贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(7): 593-597.
- [6] Jiang Yongfu, Jiang Kaiyong, Lin Junyi. Extrication method for sub-pixel center of linear structured light stripe[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071502.
江永付, 江开勇, 林俊义. 线结构光光条中心亚像素精确提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071502.
- [7] Trucco E, Fisher R B, Fitzgibbon A W, *et al.* Calibration data consistency and model acquisition with a 3-D laser striper[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1998, 11(4): 293-310.
- [8] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [9] Xue Qi. Research on the theory and technique for improving the measurement accuracy of three-dimensional measurement based on color coded structured light[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016: 26-30.
薛琦. 彩色编码结构光三维轮廓测量精度提高理论与技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2016: 26-30.
- [10] Xue Q, Wang Z, Huang J H, *et al.* Improving the measuring accuracy of structured light measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112204.
- [11] Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0508004.
刘振, 李声, 冯常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0508004.
- [12] Zhou Xingmin, Liu Hengbiao, Ge Jianmin. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0512001.
周兴敏, 刘恒彪, 葛剑敏. 激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0512001.
- [13] Cui Xijun, Yang Chuan, Liu Baohua, *et al.* Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 73-76.
崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1): 73-76.
- [14] Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Constructing feature points used for calibrating a structured light vision

- sensor by viewing a plane from unknown orientations[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2005, 43(10): 1056-1070.
- [15] Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 343-346.
许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 343-346.
- [16] Yang Wei. Research on method for extracting center of structured light stripe [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 10-13.
杨 尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 10-13.
- [17] Lu Feng, He Yunfeng. Computer graphics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 288-292.
陆 枫, 何云峰. 计算机图形学基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 288-292.
- [18] Hearn D, Baker M P. Computer graphics with OpenGL [M]. Cai Shijie, Yang Ruoyu, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 456-463.
Donald Hearn, M. Pauline Baker. 计算机图形学[M]. 蔡士杰, 杨若瑜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 456-463.