

文章编号 1004-924X(2015)11-3041-10

互参考激光光条图像质量评价

贾振元, 王灵丽, 刘 巍*, 刘 阳, 樊超楠
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:提出了互参考激光光条图像质量评价方法用于检测激光辅助立体视觉测量中的图像质量。分析了立体视觉测量中单幅激光光条图像的灰度分布特性以及左右激光光条图像灰度分布的相关性。利用光条截面灰度分布梯度表征图像清晰度,并建立了综合考虑单幅图像质量与左右图像相关质量的互参考激光光条图像质量评价方法。然后,确定质量系数的阈值,通过分析噪声对光条提取误差的影响,确定提取误差不高于 1 个像素的单幅图像质量系数 $Q_L, Q_R \in [0.2, 1)$, 通过不同表面激光光条投影实验,确定左右图像相关质量系数 $Q_{LR} \in [0.8, 1)$ 。最后,在锻造车间进行了现场实验,重建方形锻件高度为 1 747.0 mm 和 491.3 mm。实验结果显示,清晰的光条图像质量系数符合确定阈值,受噪声干扰的光条图像质量系数偏离设定阈值,验证了本文提出的质量评价方法能较好地反映激光光条图像缺陷。

关键词:立体视觉;图像质量检测;互参考图像质量评价;激光光条图像;阈值

中图分类号:TP391.4;TP242.62 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3041

Cross-referenced image quality assessment for laser stripes

JIA Zhen-yuan, WANG Ling-li, LIU Wei*, LIU Yang, FAN Chao-nan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

Abstract: A cross-referenced image quality assessment method for laser stripes was proposed to detect image quality in laser-aided stereo vision measurement. The intensity profile of laser stripes in a single image and the correlation of the same laser stripes acquired in left and right images were analyzed. Then, the definition of the images was characterized by grayscale profile gradients and a model of cross-referenced image quality assessment was proposed by taking both the single image quality and the correlation quality of left and right images into account. To determine thresholds of quality coefficients, the effect of noise on laser stripes' extraction error was analyzed and simulated, and the quality coefficients of single image Q_L, Q_R belongs to $[0.2, 1)$ with the extraction error of less than 1 pixel were determined. By projecting the lasers onto different surfaces, the correlation quality coefficients of left and right images Q_{LR} were determined to be $[0.8, 1)$. Finally, experiments were performed in a forge workshop, and the reconstructed results of forgings' heights are 1 747.0 mm and 491.3 mm. Experimental results show that the image quality coefficients of clear laser stripes conform to the thresholds, while the image quality coefficients of the laser stripes interfered by noise are deviated from the threshold. It concludes that the proposed method of image quality assessment reflects the defects in images of laser stripes very well.

Key words: stereo vision; image quality detection; cross-referenced image quality assessment; laser stripe image; threshold

收稿日期:2015-06-25;修订日期:2015-07-24.

基金项目:国家自然科学基金仪器专项资助项目(No. 51227004);国家自然科学基金面上项目(No. 51375075);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB046504);国家自然科学基金创新研究群体项目(No. 51321004)

1 引言

在立体视觉测量系统中,激光器通常作为辅助光源,用于在被测物体表面投射激光光条,两台摄像机从不同视角采集激光光条图像,并提取光条中心线作为特征信息,重建被测物体截面的形状或轮廓^[1-4]。这里激光光条图像处理与光条特征提取是物体尺寸测量的重要环节^[5]。在图像处理中,首先要进行图像检测,评价图像质量。因此,客观、准确地评价激光光条的图像质量对于激光辅助视觉测量极为重要。

按照有无参考图像,图像质量评价方法可分为全参考、弱参考和无参考图像质量评价^[6-10]。其中,全参考图像质量评价将待评价图像与标准参考图像进行对比分析需要获得参考图像的全部信息;弱参考图像质量评价只需获得标准参考图像的部分特征信息;而无参考图像质量评价则无需获取清晰的参考图像,可直接对失真图像进行评价。立体视觉测量系统并没有标准的参考图像,不过在左右两台摄像机拍摄被测物体时,两幅图像中相同的激光光条特征能够相互作为参考。因此,可以利用左右摄像机从不同角度拍摄的被测物特征彼此对照、相互参考。

关于激光光条图像的质量评价,王顺等^[11]提出以光条截面总能量作为光条图像信度来评价不同激光光条图像,以提取光条的中心点。孙大为等^[12]应用光条信度评价方法,自动调节摄像机曝光参数,通过多次拍摄实现焊缝尺寸测量。基于信度的光条质量评价方法利用光条截面能量信息,方法简便。Qi Xue 等^[13]提出一种光条中心提取可靠性的评价标准,利用类似光条信度的激光光条平均能量以及光条的对称度衡量激光光条的质量。目前,激光光条图像的评价方法主要是在分析单幅图像中激光光条图像特性的基础上,根据理想的激光光条灰度分布来评价图像质量。然而,在立体视觉测量系统中,需要对左右摄像机获取的图像进行综合评价。

本文提出了一种互参考激光光条图像质量的评价方法。首先,将左右摄像机获取的图像相同的激光光条特征相互参考,分析单幅图像中光条截面灰度分布特性与左右图像同一激光光条特征的相关性。然后,利用光条截面灰度分布梯度表

征图像清晰度,建立了综合考虑单幅图像质量与左右图像相关质量的综合评价方法,并通过光条仿真图像分析与不同表面的激光投影实验,确定质量系数的阈值。最终,通过热态锻件测量实验验证了本文提出的质量评价方法。

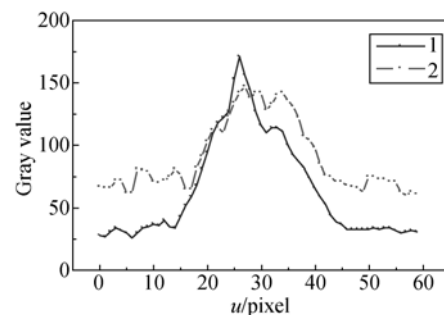
2 激光光条图像特征分析

在视觉测量中,通常采用半导体线型激光器,以发光二极管作为光源,产生的光束经柱面镜准直扩束,在一定范围内形成线型激光光束^[14-16]。理论上,线激光光束在一定距离内光强均匀且光条宽度一致,通过摄像机获取的激光光条图像沿截面呈高斯分布,沿激光光条方向灰度分布均匀。然而,由于被测物体的形状结构、光泽程度、颜色,摄像机内部产生的热噪声和电噪声等因素的干扰,实际获得的激光光条图像并非截面灰度分布一致的理想图像。因此,需要研究单幅激光光条图像的灰度分布特点。在测量现场获得的激光光条图像如图 1 所示。



(a) 激光光条图像

(a) Image of laser stripe



(b) 图(a)光条截面灰度分布

(b) Intensity profiles of sections 1 and 2 in Fig. (a)

图 1 现场激光光条图像截面的灰度分布

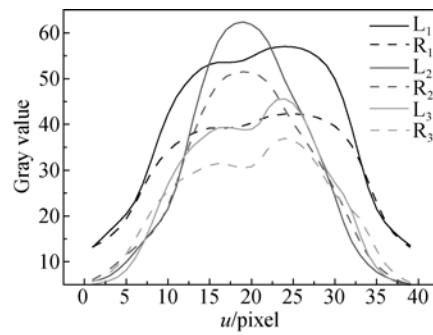
Fig. 1 Intensity profiles of field image of laser stripe

分析激光光条图像(图 1(a))在位置 1 和位置 2 的光条截面灰度分布(图 1(b))。位置 1 处的激光光条灰度值变化明显,图像清晰;而位置 2 处由于图像背景灰度增加,光条截面灰度变化小,光条特征不易识别。可见,激光光条图像的截面灰度变化会影响光条特征的提取,其截面灰度变化小,图像极易受背景噪声干扰,难以精确有效地提取光条特征。因此,激光光条图像截面的灰度值变化应易于区别背景,避免噪声干扰。

在立体视觉测量中,为使左右摄像机获取的激光光条图像的灰度分布具有一般性,首先鉴别出投影在待测物体表面的激光光条区域,并沿激光光条方向求取截面灰度均值,以平均截面灰度分布作为激光光条的灰度分布。

将激光光条投影在方形物体表面,左右摄像机分别获取激光光条图像(图 2(a)(b)),以其中典型的 3 组激光光条为例,其沿截面方向的平均灰度分布如图 2(c)所示。不同的激光器投影的激光光条图像沿截面的灰度分布不同,但基本呈中间亮,边缘暗的分布形式,两翼的灰度曲线符合高斯或类高斯分布。左右摄像机获取的同一个激光器的激光光条的两翼灰度分布相同,但在光条中心附近呈现不同亮度下的相似分布。

然而,在图像采集时,由于局部物体的遮挡或烟雾、粉尘的干扰,两摄像机获取的激光光条图像的截面灰度分布不同。物体局部遮挡造成右摄像机获取的激光光条特征的部分信息缺失(见图 3(b)),此时左右图像激光光条的截面灰度分布明显不同(见图 3(c))。图 4 为测量现场存在烟雾、粉尘,激光光条图像中出现大量噪声干扰时(图 4(a)(b)),获取的激光光条图像的截面灰度分布曲线(图 4(c))。

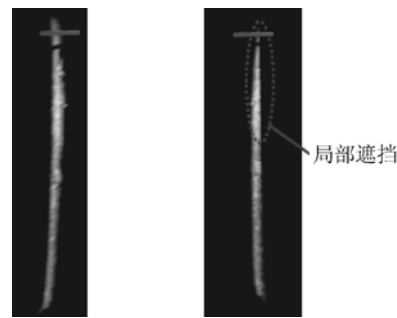


(c)图(a)(b)光条的平均灰度分布

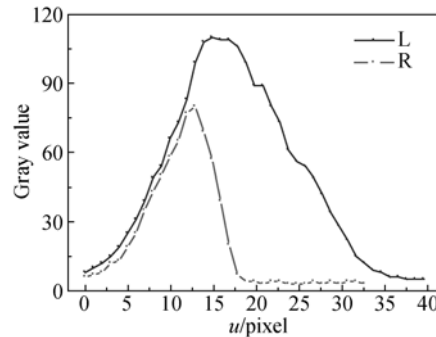
(c) Intensity profiles of strips in Fig. (a) and (b)

图 2 左右激光光条图像的灰度分布图

Fig. 2 Intensity profiles of laser stripes in left and right images



(a)左图像 (b)右图像
(a)Left image (b)Right image

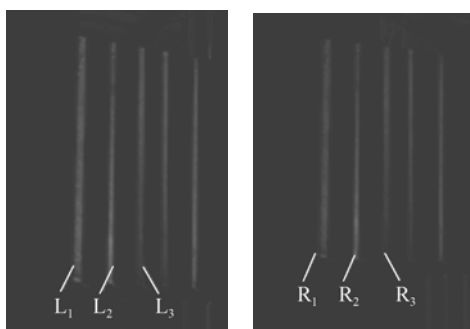


(c)图(a)(b)光条截面的灰度分布

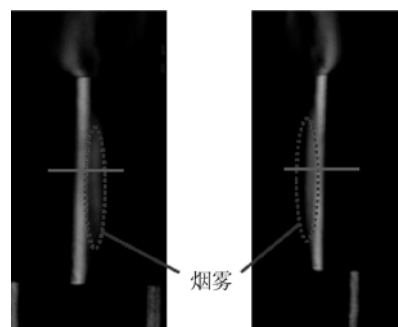
(c) Intensity profiles of strips in Fig. (a) and (b)

图 3 局部遮挡的激光光条图像的灰度分布曲线

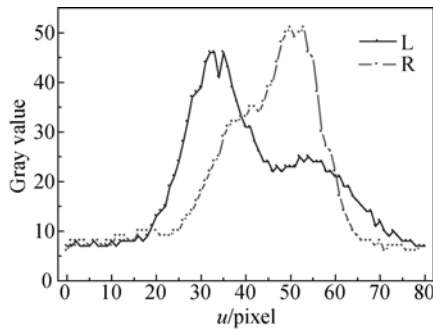
Fig. 3 Intensity profiles of partially-occluded laser stripes



(a)左图像 (b)右图像
(a)Left image (b)Right image



(a)左图像 (b)右图像
(a)Left image (b)Right image



(c)图(a)(b)光条截面的灰度分布

(c) Intensity profiles of strips in Fig. (a) and (b)

图 4 烟雾干扰时激光光条图像的灰度分布曲线

Fig. 4 Intensity profiles of laser stripes interfered by smog

左右图像激光光条的截面灰度分布具有一定的相关性,但当图像受到干扰时,截面灰度分布明显不同。基于此性质能够建立互参考的图像质量评价标准。

3 互参考图像质量评价

根据激光光条截面的灰度分布特征与左右图像的相关性,本文提出了一种互参考图像质量评价方法。它利用由激光光条截面灰度变化定义的单幅图像质量系数 $Q_L(Q_R)$,与左右图像彼此参考、相互对照的相关质量系数 Q_{LR} 来综合评价图像质量。

3.1 单幅图像质量系数

这里利用图像灰度梯度变化描述单幅激光光条图像质量。将激光光条沿其截面方向的灰度变化定义为激光光条截面的清晰度(Sharpness of Laser Stripe in Profile, SLSP),记作:

$$SLSP(v) = \frac{\sum_{u=1}^{n-1} |f(u, v) - f(u+1, v)|}{n-1}, \quad (1)$$

其中: $f(u, v)$ 为图像坐标 (u, v) 点处激光光条的灰度值; $|f(u, v) - f(u+1, v)|$ 为第 v 行相邻两像素灰度梯度的变化; $SLSP(v)$ 为第 v 行光条截面的清晰度; n 为激光光条的宽度。

将激光光条截面清晰度的平均值(Mean of SLSP, MSLSP)定义为激光光条图像的清晰度:

$$MSLSP = \frac{\sum_{v=1}^m SLSP(v)}{m} = \frac{\sum_{v=1}^m \sum_{u=1}^{n-1} |f(u, v) - f(u+1, v)|}{m \times (n-1)}, \quad (2)$$

其中 m 为激光光条的长度。光条截面清晰度主要表征激光光条图像沿截面方向每个像素与其相邻像素灰度值的变化量。灰度变化越大,图像清晰度越高,两者成正比关系。

理论上,摄像机获得清晰的理想激光光条图像,其截面灰度分布符合高斯分布^[17]:

$$g(x) = Ae^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

其中: $g(x)$ 为激光光条截面的理想灰度分布; x 为光条截面的像素坐标;幅值 $A=255$ 为图像的最大灰度;均值 μ_0 为激光光条灰度分布的中心;方差 σ^2 为通过高斯拟合求取的激光光条实际灰度分布的方差。此时,求取的激光光条图像清晰度为理想值,表示为 ISLSP(Ideal SLSP)。

将激光光条图像的平均清晰度与理想清晰度的比值定义为单幅图像的质量系数,则 Q_L, Q_R 分别为:

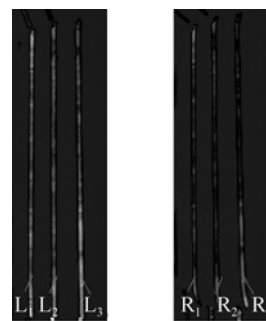
$$Q_L = \frac{MSLSP_L}{ISLSP}, Q_R = \frac{MSLSP_R}{ISLSP}, \quad (4)$$

其中 $MSLSP_L, MSLSP_R$ 分别为左右图像的激光光条图像的平均清晰度。

单幅图像的质量系数 $Q_L(Q_R) \in [0, 1]$, $Q_L(Q_R)$ 为 1 是理想值。将待评价激光光条图像的截面灰度分布与理想分布(满足峰值为最大灰度 255 的高斯分布)进行比较,待评价激光光条越接近理想分布,则图像质量越好。

3.2 图像的相关质量系数

图像的相关质量系数是左右图像分别以彼此为参考图像进行相互评价的质量系数。将激光光条投射在被测物表面,分析 SLSP 沿激光光条方向的变化趋势,如图 5 所示。

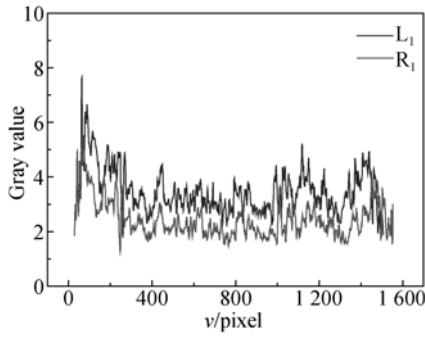


(a) 左图像

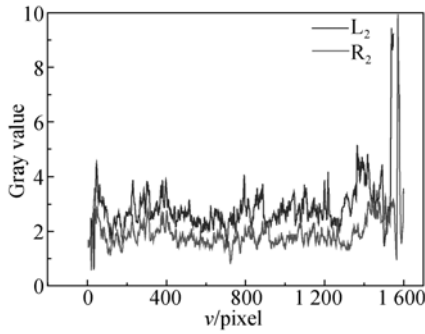
(b) 右图像

(a) Left image

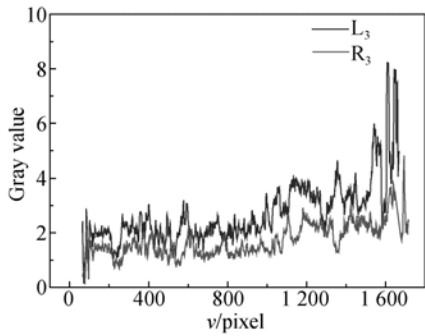
(b) Right image

(c) 光条 L_1 清晰度曲线图

(c) SLSP of laser stripe 1

(d) 光条 L_2 清晰度曲线图

(d) SLSP of laser stripe 2

(e) 光条 L_3 清晰度曲线图

(e) SLSP of laser stripe 3

图 5 左右激光光条图像的清晰度变化曲线图

Fig. 5 Curves of SLSPs for left and right images

对比 3 组激光光条分别在左右图像中 SLSP 的变化趋势(图 5(c)(d)(e))可知,SLSP 沿光条方向的变化具有相关性。由于左右图像的拍摄角度、摄像机参数不同,左图像的 SLSP 高于右图像,但沿激光光条方向左右图像的 SLSP 曲线具有相同的变化趋势。另外,当激光光条投射在同一连续表面上时,其清晰度分布连续;然而,当光条投影在轮廓边缘或投影平面发生变化时,SLSP 会发生突变(图 5(d))。根据此性质能够判断出

激光光条在同一表面的像素长度。

由于摄像机参数和拍摄角度不同,左右图像中投射在被测物表面的同一激光光条长度 l_L, l_R 不完全相同。为确定左右图像的相关性,通过线性插值法求取两激光光条相同像素坐标处的清晰度,令 $l_R = k \cdot l_L, l_L = k' \cdot l_R$ 。根据左右摄像机拍摄 SLSP 的相关系数 r ,定义激光光条的相关质量 Q_{LR} 为:

$$\begin{cases} r_{LR} = \frac{\text{Cov}(SLSP_L(j), SLSP_R(kj))}{\sigma_{SLSP_L(j)} \cdot \sigma_{SLSP_R(kj)}} \\ r_{RL} = \frac{\text{Cov}(SLSP_L(k'j'), SLSP_R(j'))}{\sigma_{SLSP_L(k'j')} \cdot \sigma_{SLSP_R(j')}} \end{cases}, \quad (5)$$

$$Q_{LR} = \frac{r_{LR} + r_{RL}}{2}, \quad (6)$$

其中: $SLSP_R(kj), SLSP_L(k'j')$ 为插值计算获得的光条截面清晰度; $\sigma_{SLSP_L(j)}, \sigma_{SLSP_R(j')}$ 分别为左右光条图像清晰度的标准差; $\sigma_{SLSP_R(kj)}, \sigma_{SLSP_L(k'j')}$ 分别为插值后左右光条图像清晰度的标准差。

图像的相关质量系数 $Q_{LR} \in [-1, 1]$ 表征了两幅图像中相同激光光条特征的相关性, Q_{LR} 为 1 是理想情况。 Q_{LR} 越大,表示两幅图像越相似。

4 图像质量系数阈值的确定

为保证特征提取的精度,需确定单幅图像质量系数 $Q_L(Q_R)$ 与左右图像的相关质量系数 Q_{LR} 的阈值,鉴别出降质图像,从而保证测量精度。

4.1 单幅图像质量系数阈值

在激光光条图像中,图像降质的主要因素为图像噪声。按照噪声与信号的关系,图像噪声可分为乘性噪声和加性噪声,乘性噪声主要为激光光条的散斑噪声,加性噪声主要为椒盐噪声和高斯噪声^[17-19]。

激光光条图像中像素点 (u, v) 坐标处的灰度值受乘性噪声和加性噪声的影响,其表达式为:

$$I_m(u, v) = I_{la}(u, v) + \theta(u, v)I_{la}(u, v) + n(u, v), \quad (7)$$

其中: $I_{la}(u, v)$ 为无噪声影响的激光灰度值,即理想的激光光条灰度分布; $\theta(u, v)$ 表示像素点 (u, v) 为中心的邻域内样本的散斑对比度; $n(u, v)$ 为加性噪声。

为了研究不同图像质量受噪声的影响情况,利用仿真获得理想的激光光条图像(图 6(a))。在仿真图像上分别添加高斯噪声、椒盐噪声和散斑噪声,获得的激光光条图像分别如图 6(b)、(c)、(d)所示。仿真图像的光条特征提取误差随噪声变化,计算受噪声影响的图像光条中心特征与理论位置的均方差,这里采用灰度重心法提取激光光条,结果分别如图 7~图 9 所示。图中, s 为高斯噪声方差, d 为椒盐噪声密度, θ 为散斑噪声对比度。

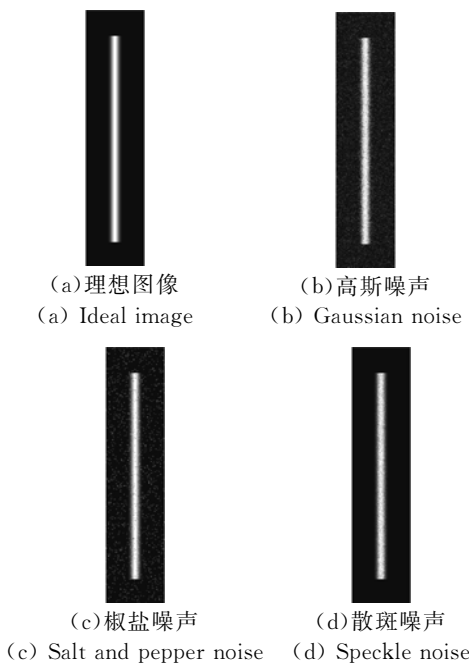


图 6 含噪声的激光光条图像

Fig. 6 Laser stripe images with different noises

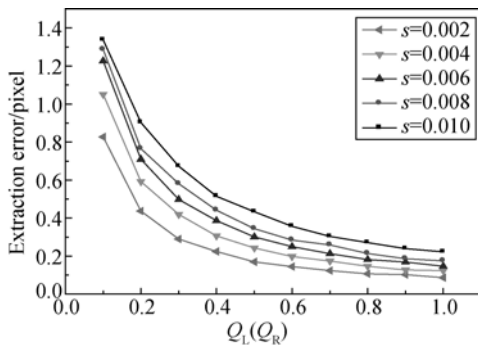


图 7 高斯噪声对激光光条图像的影响

Fig. 7 Extraction errors of laser stripe with Gaussian noise

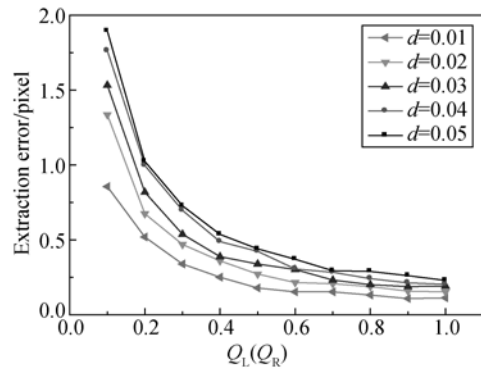


图 8 椒盐噪声对激光光条图像的影响

Fig. 8 Extraction errors of laser stripe with salt and pepper noise

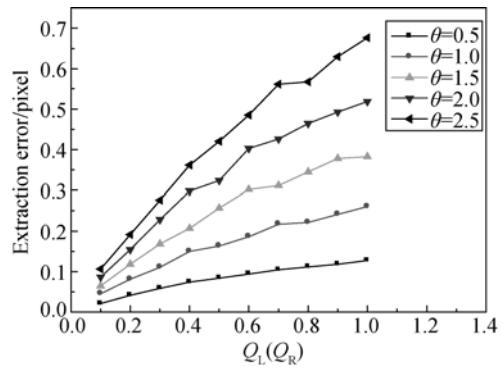


图 9 散斑噪声对激光光条清晰度的影响

Fig. 9 Extraction errors of laser stripe with speckle noise

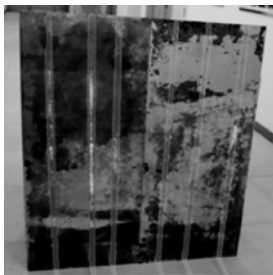
由特征提取误差受噪声的影响曲线(图 7~图 9)可知,不同的噪声类型对特征提取精度的影响不同。图像质量系数较低时,易受高斯噪声和椒盐噪声的影响,特征提取误差随着质量系数的减小而增加;图像质量系数较高时,易受散斑噪声的影响,特征提取误差随着质量系数的增加而增加。

根据噪声对图像提取精度的影响可知,当单幅图像的质量系数较低时, $Q_L, Q_R \in (0, 0.2)$,光条特征提取的误差受加性噪声的影响剧增;而当单幅图像的质量系数较高时,能够获得精度较好的提取结果。根据本文特征提取的精度要求,提取误差应不高于一个像素,因此图像质量系数的推荐阈值为: $Q_L, Q_R \in [0.2, 1)$ 。

在不同的测量环境中,可以根据允许的特征提取误差与噪声的影响程度,确定具体的质量系数阈值。

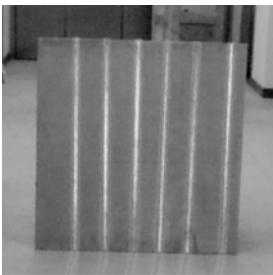
4.2 图像的相关质量系数阈值

为确定图像的相关质量系数阈值,在实验室环境下,将激光光条分别投射在两种典型的表面——锈蚀的铁板和平整木板上(见图 10)。调节激光器功率,获得不同单幅图像质量系数的光条图像,以其中一个的激光光条图像为例,对比同一激光光条在不同功率、不同表面下获取的激光光条图像的相关质量系数,结果分别如表 1、表 2 所示。



(a) 光条投影在铁板表面

(a) Projection on mental board



(b) 光条投影在木板表面

(b) Projection on wooden board

图 10 投影在不同表面的激光光条

Fig. 10 Laser strips projected on different surfaces

表 1 不同功率激光光条投影在锈蚀铁板上的图像质量

Tab. 1 Image quality of laser stripes projected on oxidized mental board with different powers

No.	P/mW	Q_L	Q_R	$Q_{L,R}$
1	300	0.221	0.185	0.847
2	500	0.518	0.424	0.826
3	600	0.681	0.557	0.866
4	700	0.797	0.652	0.871
5	800	0.888	0.728	0.872

表 2 不同功率激光光条投影在木板上的图像质量

Tab. 2 Image quality of laser stripes projected on wooden board with different powers

No.	P/mW	Q_L	Q_R	$Q_{L,R}$
1	300	0.201	0.186	0.856
2	500	0.546	0.523	0.890
3	600	0.693	0.663	0.895
4	700	0.828	0.783	0.904
5	800	0.973	0.915	0.919

对比表 1 和表 2 可知,对同一表面投射不同功率的激光光条,单幅图像的质量系数与左右图像的相关质量系数有所差异;不同的投影表面,由于材料吸收率不同,同一激光光条对应的图像质量系数也不同。在无缺陷光滑的木板表面,图像的相关质量系数较高, $Q_{L,R} \in [0.82, 1)$;在锈蚀的铁板表面,图像的相关质量系数略低, $Q_{L,R} \in [0.81, 1)$ 。因此,预设图像的相关质量系数 $Q_{L,R} \in [0.8, 1)$ 。

5 实验结果与分析

为验证本文提出的图像质量评价方法,在锻造车间进行了现场实验。搭建的实验系统如图 11 所示,两台黑白 CCD 摄像机(德国 SVS 11002MTHCTC,分辨率为 $4\ 008\ \text{pixel} \times 2\ 672\ \text{pixel}$)连接在工作站上;一组由 10 台半导体线型激光器(FU650AL200-GD16)构成的激光器阵列置于两台摄像机之间;待测物体为热态锻件,由操作机的卡钳夹持。



图 11 图像质量评价试验系统

Fig. 11 Experimental system for image quality assessment

在热态锻件表面投影激光光条,左右摄像机获得清晰的激光光条图像如图 12 所示。分别计算图中 5 个激光光条(L₁~L₅)的单幅图像质量系数与图像的相关质量系数,结果如表 3 所示。图像中激光光条清晰,单幅图像质量系数与图像的相关质量系数均符合阈值,其中互参考质量系数 Q_{L,R}均大于 0.9。



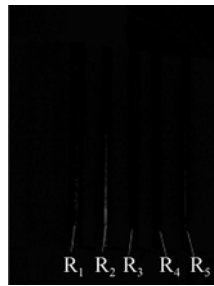
(a) 锻造现场图像

(a) Image obtained in a forge



(b) 左图像

(b) Left image



(c) 右图像

(c) Right image

图 12 锻件表面上的激光光条图像

Fig. 12 Images of laser stripes on surface of large forging

表 3 锻件表面激光光条的图像质量

Tab. 3 Image quality of laser stripe on surface of forging

No.	Q _L	Q _R	Q _{L,R}
L ₁	0.396	0.312	0.960
L ₂	0.273	0.246	0.989
L ₃	0.272	0.249	0.981
L ₄	0.235	0.213	0.978
L ₅	0.299	0.251	0.936

通过重建激光光条特征测量得到锻件的平均高度为 1 474.0 mm,图 13 为锻件的重建结果。

在锻件锻造过程中,极易出现烟雾、粉尘干扰,图 14 为受烟雾、粉尘噪声影响的激光光条图像。

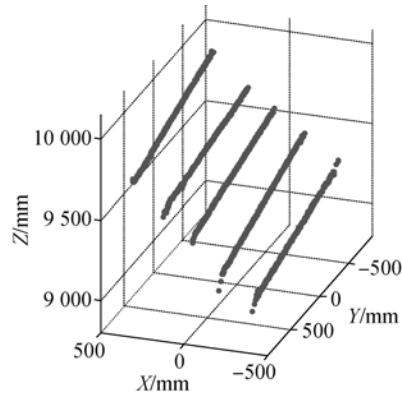


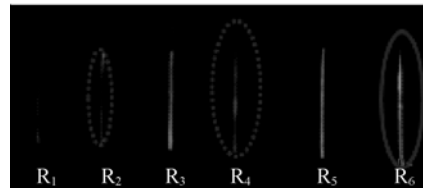
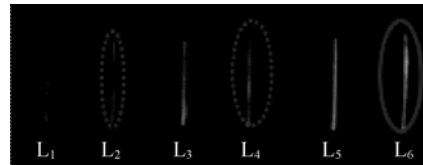
图 13 锻件测量重建图

Fig. 13 Reconstruction result of forging



(a) 锻造现场图像

(a) Image obtained in a forge



(b) 左图像和右图像

(b) Left and right images

图 14 受烟雾、粉尘遮挡的激光光条图像

Fig. 14 Laser stripe images interfered by smog and dust

图像质量系数如表 4 所示,L₂(R₂)激光光条中段受烟雾噪声的干扰,图像的相关质量系数低;L₄(R₄)激光光条的上边缘受烟雾噪声影响,激光光条边缘提取误差较大,图像的相关系数偏低。尽管 L₆ 激光光条单幅图像的质量系数较高,然而由于受到锻造操作机局部遮挡,右图像 R₆ 激光光条缺失部分特征信息,图像的相关质量系数较低。

表 4 烟雾、粉尘遮挡激光光条图像质量

Tab. 4 Image quality of laser stripes interfered by smog and dust

No.	Q_L	Q_R	Q_{LR}
L_1	0.260	0.220	0.960
L_2	0.261	0.291	0.497
L_3	0.436	0.427	0.962
L_4	0.350	0.322	0.746
L_5	0.485	0.452	0.928
L_6	0.510	0.477	0.701

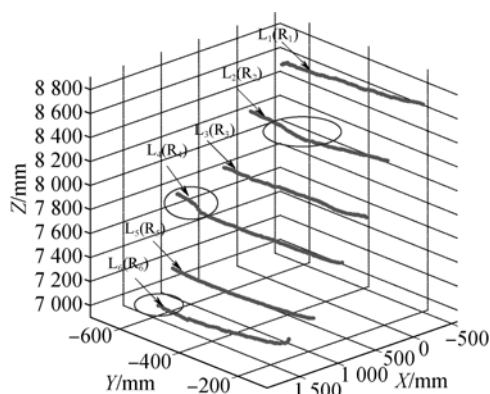


图 15 锻件测量重建图

Fig. 15 Reconstruction result of forging

图像质量较好的激光光条 L_1, L_3, L_5 , 重建锻件高度为 491.3 mm。由图 15 的重建结果可知, 光条 L_1, L_3, L_5 的重建结果较好; 由于烟雾、粉尘噪声的干扰, L_2 中段出现突变, L_4 重建出非锻件表面轮廓部分; 由于局部遮挡, L_6 局部缺失。

根据锻造现场实验, 对比清晰的光条图像质

量系数与受噪声干扰的光条图像质量系数可见, 清晰的激光光条特征能够重建出完整的锻件表面轮廓, 而受噪声干扰的激光光条重建的锻件轮廓图像失真。因此, 本文提出的激光光条图像质量评价方法能够很好地反映激光光条的图像质量。

在实际测量中, 需要首先对获取的图像进行互参考图像质量评价。满足质量系数阈值的激光光条图像的 $Q_L, Q_R \in [0.2, 1)$, 且 $Q_{LR} \in [0.8, 1)$, 它们是无严重噪声干扰, 且能够完整描述待测物体截面轮廓的特征图像; 而质量系数不符合设定阈值的图像将会被剔除, 不进行后续的图像处理、特征提取和三维重建的运算, 由此提高了三维测量的效率。

5 结 论

本文提出了一种互参考激光光条图像质量评价方法, 利用激光光条截面灰度梯度信息评价单幅激光光条的图像质量, 利用左右图像中激光光条清晰度的相关性评价互参考的图像质量, 并建立了综合考虑左右图像的互参考图像质量评价模型。通过图像噪声的仿真实验确定单幅图像的质量系数阈值 $Q_L, Q_R \in [0.2, 1)$; 通过不同表面激光光条投影的研究确定图像的相关质量系数阈值 $Q_{LR} \in [0.8, 1)$, 保证了阈值确定的合理性。最后在锻造车间进行了现场实验, 方形锻件的重建高度为 1 747.0 mm 和 491.3 mm。实验结果表明, 本文提出的质量评价方法能够真实地反映激光光条的图像缺陷。

参考文献:

- [1] 周富强, 王飞, 张广军. 结构光直线光条图像特征的三步法提取 [J]. 机械工程学报, 2008(11): 215-219.
ZHOU F Q, WANG F, ZHANG G J. Three-step extraction method for line-stripe in structured light vision [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008(11):215-219. (in Chinese)
- [2] MOLDER A, MARTENS O, SAAR T, et al.. Laser line detection with sub-pixel accuracy [J]. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2014,20(5):132-135.
- [3] QI L, ZHANG Y, WANG S, et al.. Laser cutting of irregular shape object based on stereo vision laser galvanometric scanning system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015,68:180-187.
- [4] XU G, SUN L, LI X, et al.. Adaptable center detection of a laser line with a normalization approach using Hessian-matrix eigenvalues [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2014, 18(4): 317-329.
- [5] 冯萍, 刘震. 舵面角度测量中结构光光条图像自动定位方法 [J]. 中国光学, 2014,7(6):911-916.
FENG P, LIU ZH. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2014,7(6): 911-916. (in Chinese)
- [6] 钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 无参考的特征点复杂度激

- 光干扰图像评估 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4):1179-1186.
- QIAN F, SUN T, GUO J, *et al.*. No-reference laser-dazzling image quality assessment based on feature-point complexity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1179-1186. (in Chinese)
- [7] 邵枫, 姜求平, 蒋刚毅, 等. 基于显著性分析的立体图像视觉舒适度预测 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1631-1638.
- SHAO F, JIANG Q P, JIANG G Y, *et al.*. Prediction of visual discomfort of stereoscopic images based on saliency analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1631-1638. (in Chinese)
- [8] 佟晓煦, 李素梅, 刘富岩, 等. 基于人类视觉的感知立体图像质量评价方法 [J]. 光电子·激光, 2015(2):378-386.
- TONG X X, LI S M, LIU F Y, *et al.*. A perceptual stereoscopic image quality assessment method based on human visual system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015(2):378-386. (in Chinese)
- [9] 马旭东, 闫利, 曹伟, 等. 一种新的利用梯度信息的图像质量评价模型 [J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2014(12):1412-1418.
- MA X D, YAN L, GAO W, *et al.*. A new image quality assessment model based on the gradient information [J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*, 2014(12):1412-1418. (in Chinese)
- [10] DAS D, NAYAK A K. *Investigation of Full-Reference Image Quality Assessment* [M]. Springer, 2015:449-456.
- [11] 王顺, 徐静珠, 张益昕, 等. 结构光光条中心点信度评价方法与应用 [J]. 光学学报, 2011(11): 203-209.
- WANG SH, XU J ZH, ZHANG Y X, *et al.*. Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(11):203-209. (in Chinese)
- [12] 孙大为, 蔡艳, 朱俊杰, 等. 基于信度评价的焊缝结构光自适应多次曝光法 [J]. 焊接学报, 2014(6):85-89.
- SUN D W, CAI Y, ZHU J J, *et al.*. Multiple exposure for weld structured light based on reliability evaluation [J]. *Transactions of the China welding institution*, 2014(6):85-89. (in Chinese)
- [13] QI X, ZHAO W, JUN H H, *et al.*. Improving the measuring accuracy of structured light measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11):112204-112209.
- [14] 王春艳. 激光测量中光条关键技术研究 [D]. 长春:吉林大学, 2014.
- WANG CH Y. *Research on Key Technologies of Light Stripe in Laser Measurement* [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [15] SHEALY D L. Theory of geometrical methods for design of laser beam shaping systems [J]. *SPIE*. 2000, 4095: 1-15.
- [16] DICKEY F M, HOLSWADE S C. Gaussian laser beam profile shaping [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11):3285-3295.
- [17] STEGER C. Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, 117(2):97-112.
- [18] 赵博华, 王伯雄, 张金, 等. 粗糙金属表面光条中心提取方法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2138-2145.
- ZHAO B H, WANG B X, ZHANG J, *et al.*. Extraction of laser stripe center on rough metal surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2138-2145. (in Chinese)
- [19] QI L, ZHANG Y, ZHANG X, *et al.*. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13442-13449.

作者简介:



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,1980年、1984年、1987年于大连理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为精密/特种加工、精密测量、精密控制。E-mail:jzyxy@dlut.edu.cn

通讯作者:



刘巍(1979—),男,内蒙赤峰人,博士,副教授,博士生导师,2007年于大连理工大学获得博士学位,主要从事功能材料与智能控制等方面的研究。E-mail:lw2007@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)