

## 激光与光电子学进展

## 线结构光条成像质量多参数综合评价方法研究

李涛涛<sup>1\*</sup>, 沈培<sup>1</sup>, 钟小倩<sup>1</sup>, 许献磊<sup>2</sup>, 刘江英<sup>1</sup><sup>1</sup>萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055;<sup>2</sup>中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083

**摘要** 光条成像质量是决定线结构光三维测量精度的重要因素之一。为解决现有光条成像质量评价方法对整体与细节评价兼顾不全、评价依据单一等问题,提出了一种线结构光条成像质量多参数综合评价方法。首先从图像一维熵、局部对比度和光条清晰度三方面,对渐变曝光时间下采集的系列光条图像进行特征分析。接着以系列图像的光心提取精度反向评价光条成像质量,并分析多特征参数随光心提取精度的变化规律。在此基础上,实现多特征参数对系列光条图像质量的综合评价,并构建多参数综合量化评价模型。实验结果表明:与已有方法相比,所提方法评价结果更准确、有效,由评得优质光条图像重构出的高精度齿条轮廓精度最高,其 $R_{ssa}$ 值仅为0.022。

**关键词** 仪器,测量与计量;线结构光;光条成像质量;多参数综合评价;图像一维熵;局部对比度;光条清晰度

中图分类号 TG806;TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220829

## Research on Imaging Quality Comprehensive Evaluation by Multi-Parameters of Line Structured Light Stripe

Li Taotao<sup>1\*</sup>, Shen Pei<sup>1</sup>, Zhong Xiaoqian<sup>1</sup>, Xu Xianlei<sup>2</sup>, Liu Jiangying<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Electromechanical Engineering, Pingxiang University, Pingxiang 337055, Jiangxi, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** The imaging quality of light stripe is one of the important factors determining the 3D measurement accuracy of line structured light. In order to solve the problems of poor consideration of the image's whole and details and lack of comprehensive evaluation criteria in the present imaging quality evaluation methods of light stripe, an imaging quality comprehensive evaluation method by multi-parameters of line structured light stripe is proposed. First, the characteristics of light stripe image set acquired with a gradual change in exposure time are analyzed from three aspects: one-dimensional image entropy, local contrast, and light stripe's definition. Then the imaging quality of light stripe images are reversely evaluated by the extraction accuracy of the image set's light stripe centers, and the change rule of multi-feature parameters with the light stripe center extraction accuracy is analyzed. Finally, the imaging quality is comprehensively evaluated by multi-feature parameters of line structured light stripe image set, and the multi-parameter comprehensive quantitative evaluation model is constructed. The experimental results show those the evaluation result of the proposed method is more accurate and effective than those of the existing methods, and the high-precision rack measurement results obtained from the evaluated high-quality light stripe images have the highest accuracy, whose  $R_{ssa}$  value is only 0.022.

**Key words** instruments, measurement and metrology; line structured light; imaging quality of light stripe; multi-parameters comprehensive evaluation; one-dimensional image entropy; local contrast; light stripe definition

## 1 引言

线结构光测量是数字化三维测量的主要方法之

一,以其结构简单、精度高和可拓展性强等特点被广泛应用于逆向工程、质量检测 and 测绘工程等领域<sup>[1-4]</sup>。线结构光测量效果和精度受传感器参数、参数标定方法、

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-03-21; 录用日期: 2022-03-30; 网络首发日期: 2022-04-10

基金项目: 江西省自然科学基金(20212BAB214047)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM20KFA08)、江西省教育厅科学技术研究项目(202710)

通信作者: \*ltaotao1988@126.com

光条成像质量和光条中心提取方法等方面的影响<sup>[5-8]</sup>,其中光条成像质量直接影响了光条中心提取精度,最终影响三维测量精度,因此为获得优质光条成像,研究光条成像质量评价方法对提高线结构光测量效果具有重要的作用。

光条成像质量评价多以人工经验主观评价为主,由于缺乏客观科学依据,评价结果不准确且差异性较大,为此光条成像质量评价研究陆续进入量化评价阶段。李伟仙等<sup>[9]</sup>综合考虑影响光条图像能量集中度的峰值灰度和光条宽带,提出了一种基于加权能量集中度的光条成像质量评价方法,其基本思想是“越靠近光条中心的像素灰度值对光条能量集中度影响越大”。赵博华等<sup>[10]</sup>从图像照度的角度出发,提出了一种基于平均归一化灰度值指标的光条图像质量评价方法,确立被测范围照度与图像平均归一化灰度值的对应关系。王一波等<sup>[11]</sup>为提高光条中心提取算法的精确度和不同场景的适应性,在分析了光条图像特征和噪声影响的基础上,提出了基于亮度、信息量的光条图像质量评价方法。李涛涛等<sup>[12]</sup>、孙大为等<sup>[13]</sup>在进行线结构光三维测量的相机曝光时间优化和自适应多次曝光调节研究时,将光条的信度评价作为结构光图像的质量评价参数,根据光条信度评价结果来确定相机曝光时间,以此获得最佳的光条图像。贾振元等<sup>[14]</sup>提出了一种互参考光条图像质量评价方法,以实现激光辅助立体视觉中的图像质量评价,由光条截面灰度梯度信息评价单幅图像质量,由左右图像中光条清晰度的相关性评价互参考图像质量。刘超等<sup>[15]</sup>为克服多变被测物和环境光对激光测头精度的影响,研究了激光侧头的自适应调整方法,其中光条成像质量评价基于光条截面归一化高斯模型实现。徐晓睿等<sup>[16]</sup>、Zhang等<sup>[17]</sup>和张来线等<sup>[18]</sup>为实现相机自动调焦,分别从光条图像频域、空域梯度信息等角度对图像清晰度量评价方法进行了研究。由此可见,已有研究大多可量化评价指标不多、评价依据单一,未能兼顾图像全局和光条细节开展光条成像质量的综合评价,因此评价结果的准确性有待进一步提高。

本文研究了线结构光成像质量多参数综合评价方法,以期实现光条质量的精准评价。从光条图像全局的一维熵、局部对比度特征和光条局部的清晰度特征出发,分析系列光条图像的多特征参数随光心提取精度的变化规律。在此基础上,实现多特征参数对系列光条图像的综合评价,最终构建出多参数的综合量化评价模型,并对所提方法进行了实验验证分析。

## 2 线结构光条图像特征

光条成像质量是激光器和相机参数调节的主要依

据,直接影响了光条中心提取精度和最终的三维测量精度,因此光条成像质量评价显得尤为重要。在光条成像质量评价方法研究之前,先要采集成像质量不同的系列光条图像,构建光条图像集。为图像集构建方便,仅考虑曝光时间对图像质量的影响,相机依次以不同的曝光时间对外界照度条件(300 lx)稳定的水泥路面模型的光条图像进行采集。相机的曝光时间范围为100~15000  $\mu\text{s}$ ,间隔为100  $\mu\text{s}$ 。将采集到的系列光条图像作为光条成像质量评价研究的原始图像集  $U$ ,  $U$  可以表示为

$$U = \{s_i | i = t/10 - 9, 100 \leq t \leq 15000\}, \quad (1)$$

式中:  $s_i$  为采集的第  $i$  张光条图像;  $t$  为曝光时间。为了保证光条图像特征分析的准确性,避免光条成像受相机 gamma 值的影响,在图像采集时需要将相机的 gamma 值配置为 1。

### 2.1 系列光条图像一维熵特征

高质量的光条图像要求图像中前景光条轮廓凸显,而背景尽量暗化。图像熵反映了图像整体平均信息量的多少,而图像一维熵可以表示图像中灰度分布的聚集特征所包含的信息量。对灰度图像  $s$ , 图像一维熵  $H$  的计算公式为

$$H(s) = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i, \quad (2)$$

式中,  $p_i$  为图像  $s$  中灰度为  $i$  的像素数。高质量的光条图像要求灰度分布有“大量的低灰度级像素,少量的高灰度级像素,几乎没有中灰度级像素”特征,有显著的灰度分布聚集特征。灰度分布聚集特征的信息量大小(即图像一维熵)可一定程度反映图像质量。计算图像集  $U$  中每幅图像的一维熵值,分析不同曝光时间对图像一维熵值的影响情况,结果如图 1 所示。图中选取了曝光时间分别为 300、2000、8000、14000  $\mu\text{s}$  时的光条图像。

由图 1 可见,随着曝光时间增加,图像的一维熵值逐渐变大,变化趋势“前陡后缓”,整体呈现为底数大于 1 的对数曲线,拟合的曲线函数为

$$H(t) = -6.09 + 1.38 \ln(t + 118.56). \quad (3)$$

按线结构光测量的光条质量经验标准,主观评价光条成像质量,划分出优质光条成像(#2)和劣质光条成像(#1、#3)两类。劣质光条成像范围#1内,图像一维熵值较小,虽然前景光条与背景差异较大,但由于曝光时间过短,光条局部未完整成像(见图 1 的#4处局部放大结果),致使前景光条的连续性较差。在范围#3内,图像一维熵值偏大,由于曝光时间相对较长,前景光条过曝而变粗,背景水泥路面细节信息增多(见图 1 的#5处局部放大结果)。在范围#2内,图像一维熵值适中,光条明显且完整性较好,前景和背景差异较大。

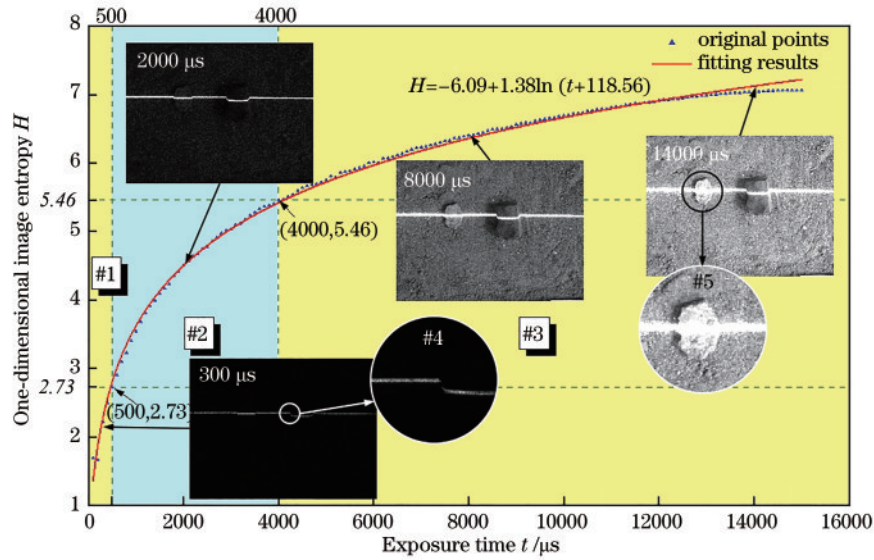


图 1 系列光条图像一维熵值变化情况

Fig. 1 One-dimensional image entropy changes of light stripe image set

2.2 系列光条图像局部对比度特征

高质量光条图像的前景与背景灰度反差较大,而图像对比度可量化评价图像灰度差异情况,因此光条图像对比度大小也可一定程度反映光条成像质量。此处选择图像的局部对比度作为光条成像质量评价指标,因为局部对比度更加关注局部范围内的最大与最小灰度级,与光条图像高灰度级的前景光条区域和低灰度级的背景区域相吻合。对于大小为  $a \times b$  的图像  $s$ ,若  $A(i, j)$  为图像  $s$  的像素点,则该像素点局部  $3 \times 3$  区域内的局部对比度  $C(i, j)$  为

$$C(i, j) = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (4)$$

式中,  $A_{\max}$  和  $A_{\min}$  分别为  $A(i, j)$  像素  $3 \times 3$  窗口内的灰度最大值和灰度最小值。整幅光条图像的局部对比度  $C$  为每个像素的局部对比度  $C(i, j)$  累加之后求均值,即

$$C = \frac{1}{a \times b} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b C(i, j). \quad (5)$$

依次统计图像集  $U$  中每幅光条图像的局部对比度,分析不同曝光时间对光条成像质量、图像局部对比度的影响情况,具体结果如图 2 所示。从图中可知,随着曝光时间增加,图像局部对比度逐渐变小,变化趋势“先急后缓”,整体呈现为对数曲线,拟合的曲线函数为

$$C(t) = 0.96 - 0.06 \ln(t - 398.80). \quad (6)$$

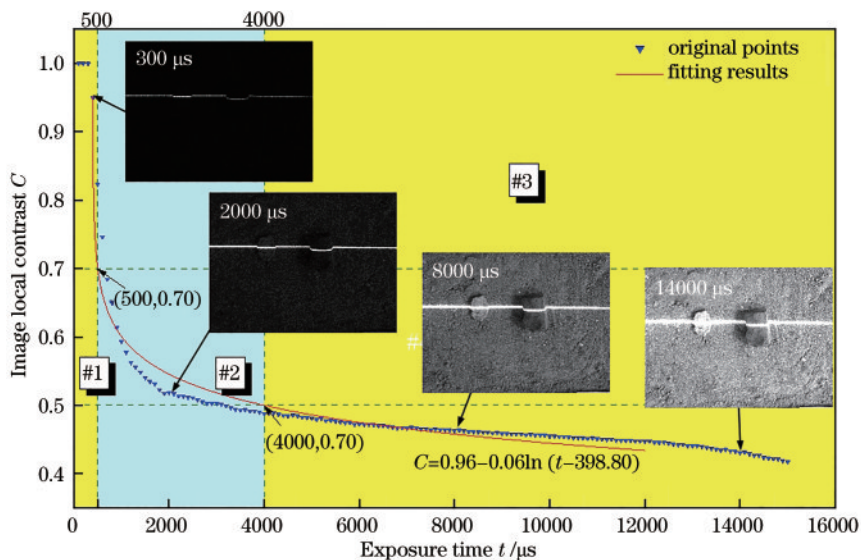


图 2 系列光条图像局部对比度变化情况

Fig. 2 Local contrast changes of light stripe image set

同样参照 2.1 节方法,将光条成像质量凭经验划分为优质光条成像(#2)和劣质光条成像(#1、#3)两类,

相应的曝光时间  $t$ 、图像一维熵值  $H$  和局部对比度范围  $C$  见表 1。结合图 2 和表 1 可知,劣质光条成像范围 #1

表 1 光条成像质量经验评价结果对应  $t, H$  的范围

Table 1 Corresponding  $t$  and  $H$  ranges of light stripe imaging quality empirical evaluation results

Characteristic parameter	High quality light stripe image		Poor quality light stripe image	
	Region #2	Region #1	Region #3	
Exposure time $t / \mu\text{s}$	500-4000	100-500	4000-15000	
One-dimensional image entropy $H$	2.73-5.46	1.68-2.73	5.46-7.06	
Image local contrast $C$	0.5-0.7	0.7-1.0	0-0.5	

内,图像局部对比度较大,虽然背景与前景光条的灰度差异较大,但由于曝光时间过短,光条不完整成像。在范围#3内,图像局部对比度偏小,由于曝光时间相对较长,背景信息过度成像,前景光条和背景灰度差异不大。在范围#2内,图像局部对比度适中,光条明显且完整性较好,前景和背景的灰度差异较大。

### 2.3 系列光条图像光条清晰度特征

图像一维熵和局部对比度都是对光条图像进行整体评价,对光条细节的评价能力有限。为此,此节将关注光条本身的质量评价特征,将光条清晰度作为评价参数。光条截面清晰度  $q$  是指光条截面方向上灰度变化情况,所有截面的清晰度取平均值定义为光条清晰度  $Q$ :

$$Q = \sum_{j=1}^b q(j) / b = \frac{\sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{w-1} |g(i, j) - g(i+1, j)|}{b \times (w-1)}, \quad (7)$$

式中:  $g(i, j)$  为坐标  $(i, j)$  处光条灰度值;  $|g(i+1, j) - g(i, j)|$  为第  $j$  列光条截面相邻像素灰度梯度变化;  $q(j)$  为第  $j$  个截面清晰度;  $b$  为光条长度;  $w$  为光条截面宽度。需要注意的是,上式仅适用于横向光条,为满足该要求,首先在测量前尽量调整相机和激光器,使得光条成像为横向;其次经图像处理提取成像光条的直线方

程,再以光条法线方向旋转图像,使光条回归横向<sup>[9,19]</sup>。理想情况下,光条成像的截面灰度应该严格符合高斯分布,此时的光条清晰度为理想光条清晰度  $Q_1$ 。将实际光条清晰度  $Q$  与理想光条清晰度  $Q_1$  的比值定义为光条清晰度系数  $\beta$ :

$$\beta = Q/Q_1, \quad (8)$$

即光条截面灰度分布符合理想高斯分布情况下,可由式(7)计算得到。 $\beta$  取值范围为  $[0, 1]$ ,  $\beta$  值越大,光条截面灰度越接近理想高斯分布。

对图像集  $U$  中每幅光条图像依次计算其光条清晰度系数,分析不同曝光时间下光条清晰度系数的变化情况,具体结果如图3所示。从图中可以看出,随着曝光时间增加,光条清晰度系数“先快速变大,后缓慢变小”,两阶段均基本呈线性变化。同样将图像集划分出优质光条成像(#7)和劣质光条成像(#6、#8)两类。以光条清晰度系数  $\beta$  值为 0.9 作为节点,  $\beta$  值高于 0.9 为优质光条成像,  $\beta$  值低于 0.9 为劣质光条成像。优质光条成像的曝光时间  $t$  范围为 1200~3700  $\mu\text{s}$ , 其中  $t$  为 1600  $\mu\text{s}$  时  $\beta$  值最大(0.99), 光条成像质量最好, 光条清晰度最高。范围#6中优质光条成像曝光时间范围(1200~3700  $\mu\text{s}$ )对 2.1、2.2 节中划定的范围#2中优质光条成像曝光时间范围(500~4000  $\mu\text{s}$ )进行了进一步限定。

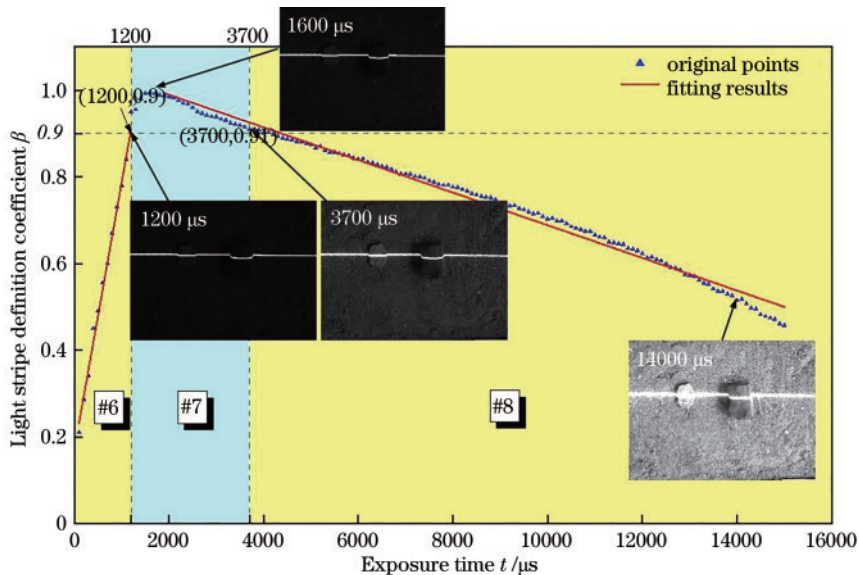


图 3 系列光条图像光条清晰度系数变化情况

Fig. 3 Definition coefficient changes of light stripe image set

### 3 光条成像质量评价

上述第 2 节从图像整体和光条自身细节成像质量评价出发,分析了系列光条图像的一维熵、局部对比度和光条清晰度特征。并从经验评价角度,粗略地对系列光条质量进行了质量优劣等级划分。但由于缺乏图像质量量化评价的依据,致使评价结果受主观因素影响较大,其科学性和合理性有待验证。为此,本节将结合上述光条多特征分析结果,对光条成像质量开展多参数的综合评价。

#### 3.1 光条成像质量多参数综合评价

采用相同的光条中心提取方法,光条中心提取精度主要取决于光条图像质量。为此,进一步以系列光条图像的光条中心提取结果的精确性为依据,将不同曝光时间光条图像光条中心提取结果与“理想光条中心位置”的平均偏差  $R_a$  作为评价标准,来反向评价光条成像质量;平均偏差  $R_a$  越大,光条质量越差,  $R_a$  越小,光条质量越好。

考虑提取方法的精度和鲁棒性问题,“理想光条中心位置”的提取选用前期本文作者团队研究形成的基于高斯-洛伦兹分峰拟合的光条中心提取方法<sup>[20]</sup>。该方法通过分峰拟合的方式,有效解决了光条截面多极值引发提取精度不高等问题,其拟合模型为

$$F(x) = pG(x) + (1-p)L(x), \quad (9)$$

式中:  $G(x)$  为高斯拟合主峰;  $L(x)$  为洛伦兹拟合次峰;  $p$  为高斯主峰占比。  $G(x)$ 、 $L(x)$  的计算过程为

$$G(x; A, B, C) = A \exp \left[ - \left( \frac{x-C}{B} \right)^2 \right], \quad (10)$$

$$L(x; D, E) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{D}{(x-E)^2 + D^2} \right], \quad (11)$$

式中:  $G(x)$  包含三个参数,  $A$ 、 $B$  为尺度相关参数,  $C$  为

主峰位置;  $L(x)$  包含两个参数,  $D$  为次峰的半峰全宽,  $E$  为次峰位置。以上参数在给定初始参数后,经分峰拟合确定。采用该方法对上述范围 #2 内 (500~4000  $\mu\text{s}$ ) 的优质光条图像进行光条中心提取,取提取结果中各像素点的平均值作为“理想光条中心位置”。

进一步考虑光条中心的提取速度和精度,在现有常用的阈值法、极值法、Steger 法中<sup>[21]</sup>,选用“灰度阈值+灰度重心”法对系列光条图像完成中心位置提取。该方法首先通过设定的灰度阈值,后经图像行列扫描筛选出满足要求的像素点集  $M$ ,再利用灰度重心法求取光条中心位置坐标,如下式所示:

$$\begin{cases} M = \{u_i | g(u_i) \geq T, T = g_{\max} - \Delta g\} \\ u = \frac{\sum_{i=1}^w [g(u_i) \times u_i]}{\sum_{i=1}^w g(u_i)}, u_i \in M \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $T$  为设定的阈值;  $g_{\max}$  为图像最大灰度值;  $\Delta g$  为灰度容值大小;  $g(u_i)$  为像素点  $u_i$  的灰度值;  $w$  为光条截面所在列(行)的长度。

系列光条图像的光条中心提取偏差  $R_a$  随曝光时间  $t$  变化情况见图 4。为更加方便地集中展示和对比图像一维熵  $H$ 、局部对比度  $C$  随曝光时间  $t$  变化的情况,分析它们之间的影响规律,图 4 中叠加了“ $t-H$ ”、“ $t-C$ ”和“ $t-\beta$ ”变化曲线。从图中可以看出,光条中心提取偏差  $R_a$  随曝光时间  $t$  增加,呈现逐渐变大的趋势,但局部范围增长情况有所不同,整体可划分为 S1、S2、S3 三个阶段: S1 阶段 (100  $\mu\text{s} \leq t < 1200 \mu\text{s}$ ),  $R_a$  值偏小,随  $t$  值增加  $R_a$  值有所减小,但降幅微弱; S2 阶段 (1200  $\mu\text{s} \leq t \leq 2700 \mu\text{s}$ ),  $R_a$  值几乎不变,恒定在 0.26~0.30 范围内; S3 阶段 (2700  $\mu\text{s} < t \leq 15000 \mu\text{s}$ ),  $R_a$  值增幅较大,整体呈线性增大的趋势,最大值趋近 17.20。S2 阶段的  $R_a$  值最小,说明该阶段光条中心提取精度最高,光条成像质量最好,并且 S2 阶段的曝光时间范围 (1200  $\mu\text{s} \leq t \leq 2700 \mu\text{s}$ ) 正好处在 2.1、2.2 和 2.3 节中经验评价划

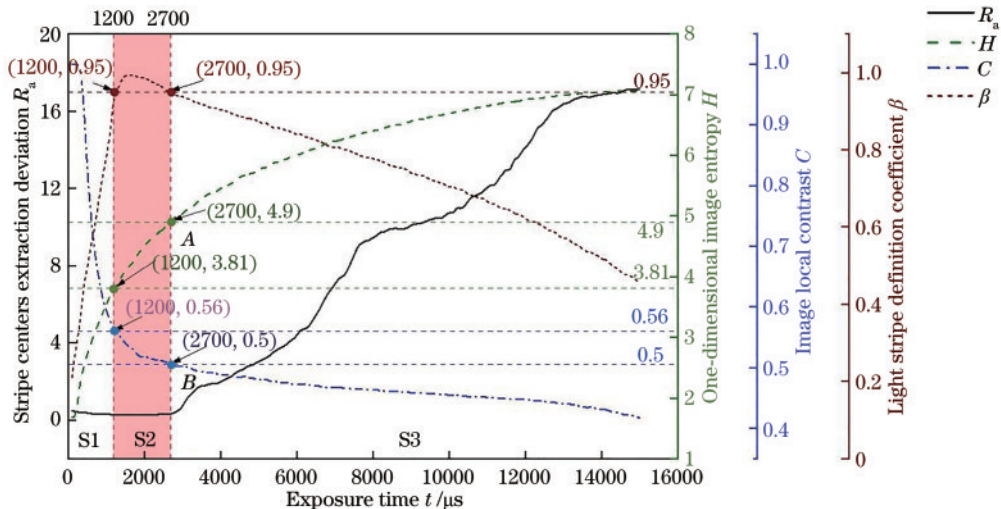


图 4 系列光条图像光心提取偏差  $R_a$  与  $H$ 、 $C$ 、 $\beta$  的同步变化情况

Fig. 4 Synchronous changes of light stripe image set's  $H$ ,  $C$ ,  $\beta$ , and stripe centers extraction deviation  $R_a$

定的两个优质光条图像曝光时间范围 ( $500 \mu\text{s} \leq t \leq 4000 \mu\text{s}$ 、 $1200 \mu\text{s} \leq t \leq 3700 \mu\text{s}$ ) 之内。

基于上述分析,系列光条图像集  $U$  中优质光条图像的图像一维熵  $H$ 、图像局部对比度  $C$ 、光条清晰度系数  $\beta$  和光条中心提取偏差  $R_a$  四个综合评价参数的取值范围统计如表 2 所示。

表 2 图像集  $U$  中优质光条图像的  $H$ 、 $C$ 、 $\beta$ 、 $R_a$  参数取值范围  
Table 2 Value ranges of  $H$ ,  $C$ ,  $\beta$ , and  $R_a$  of high quality light stripe images in image set  $U$

Evaluation parameter	Value range
Exposure time $t / \mu\text{s}$	$1200 \leq t \leq 2700$
One-dimensional image entropy $H$	$3.81 \leq H \leq 4.90$
Image local contrast $C$	$0.50 \leq C \leq 0.56$
Light stripe definition coefficient $\beta$	$0.95 \leq \beta \leq 1.00$
Stripe centers extraction deviation $R_a$	$0.26 \leq R_a \leq 0.30$

### 3.2 光条成像质量综合评价模型构建

以系列光条图像的光条中心提取精度  $R_a$  为依据,分析光条图像的一维熵  $H$ 、局部对比度  $C$ 、光条清晰度  $\beta$  等特征参数随  $R_a$  的变化规律,能更加准确地对光条成像质量进行有效评价。为进一步量化评价,结合以上多参数分析评价结果,构建综合评价模型  $E$  为

$$E(H, C, \beta; \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \begin{cases} m(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), H \geq A \text{ or } C \leq B, m \text{ is a constant} \\ \lambda_1 \text{norm}(H) + \frac{\lambda_2}{C} + \lambda_3\beta, H, C \text{ are others} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为评价特征参数  $H$ 、 $C$ 、 $\beta$  的权重系

数;  $A$ 、 $B$  分别为  $H$ 、 $C$  参数的界限取值,大小取决于光条成像场景;  $m$  为常量,由  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $A$ 、 $B$  的取值大小决定;  $\text{norm}$  为归一化函数。 $E$  的取值范围为  $0 \sim 100$ ,  $E$  值越大,光条成像质量越高。

所构建的评价模型考虑了特征参数  $H$ 、 $C$ 、 $\beta$  对成像质量评价  $E$  值的贡献程度 ( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ ), 以及特征参数变化对  $E$  值的贡献趋势。图像一维熵  $H$  值、光条清晰度系数  $\beta$  值均与  $E$  值成正比例关系,而局部对比度  $C$  值与  $E$  值成反比例关系。但是,当  $H$  值和  $C$  值超出规定范围 (即  $H \geq A$  或  $C \leq B$ ),  $E$  值不再满足上述条件,而是取恒定值  $m$ 。如文中构建光条图像集  $U$  场景下,特征参数  $H$ 、 $C$ 、 $\beta$  的权重系数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为 10、20、40;  $H$ 、 $C$  参数的界限  $A$ 、 $B$  取值分别为 4.9、0.5; 常量  $m$  取值为 75, 则光条成像质量评价  $E$  值在 75~100 以内为优质光条图像。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 光条质量评价实验

为验证本文所提的光条成像质量多参数综合评价方法的有效性,另外选取了喷漆金属板作为线结构光条的照射面,采集不同曝光时间下的光条图像 (如图 5 所示),运用上述综合评价模型对新场景下的光条图像进行成像质量评价,评价结果如表 3 所示。评价前先对光条图像进行特征分析,确定综合评价模型各评价特征参数的权重系数值 ( $\lambda_1=10$ 、 $\lambda_2=20$ 、 $\lambda_3=40$ ), 以及  $H$ 、 $C$  参数的界限值 ( $A=4.2$ 、 $B=0.4$ ), 常量  $m=70.8$ 。

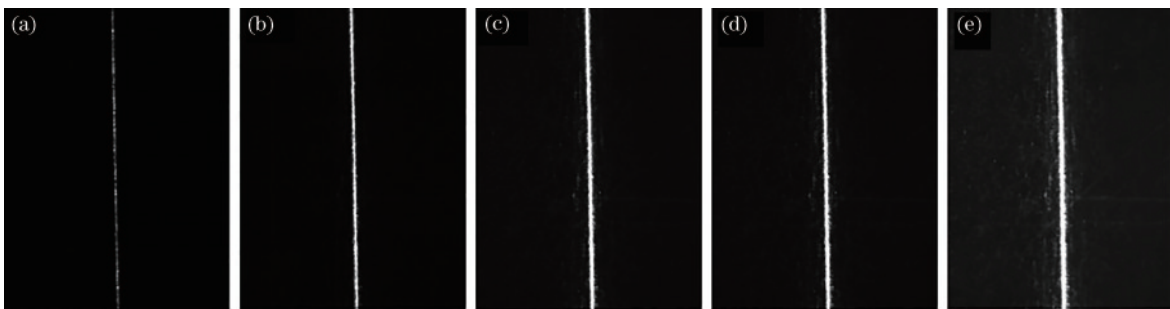


图 5 不同曝光时间  $t$  下喷漆金属板光条成像。(a)  $t=200 \mu\text{s}$ ; (b)  $t=1000 \mu\text{s}$ ; (c)  $t=2000 \mu\text{s}$ ; (d)  $t=2500 \mu\text{s}$ ; (e)  $t=5000 \mu\text{s}$   
Fig. 5 Light stripe imaging results of metal plate under different exposure time  $t$ . (a)  $t=200 \mu\text{s}$ ; (b)  $t=1000 \mu\text{s}$ ; (c)  $t=2000 \mu\text{s}$ ; (d)  $t=2500 \mu\text{s}$ ; (e)  $t=5000 \mu\text{s}$

表 3 图 5 中光条成像多参数综合评价结果

Table 3 Multi-parameters comprehensive evaluation results of light stripe images in Fig. 5

Exposure time $t / \mu\text{s}$	One-dimensional image entropy $H$	Image local contrast $C$	Light stripe definition coefficient $\beta$	Comprehensive evaluation result $E$
200	2.49	0.98	0.31	35.2
1000	3.98	0.56	0.94	97.2
2000	4.64	0.51	0.95	98.4
2500	4.91	0.50	0.93	96.3
5000	6.23	0.46	0.85	70.8

从结果可以看出:曝光时间为  $2000\ \mu\text{s}$  时,光条图像的综合评价  $E$  值最大(98.4),成像质量最佳;曝光时间在  $1000\ \mu\text{s}$  和  $2500\ \mu\text{s}$  时, $E$  值也较大,成像质量优良, $1000\ \mu\text{s}$  时的成像质量仅次于  $2000\ \mu\text{s}$  时,由此也可以判断出最优曝光时间在  $1000\sim 2500\ \mu\text{s}$  范围内;曝光时间过短和过长的  $E$  值均偏小,其中  $t$  为  $200\ \mu\text{s}$  时, $E$  值仅为 35.2。

#### 4.2 高精度齿条测量实验

将文中所研究的评价方法应用到实际的三维测量中,比较测量精度的变化可有效验证方法的评价准确性,为此本节设计了高精度齿条的线结构光三维测量实验。被测对象为高精密的钢制齿条,齿条表面氧化成黑色,加工误差为  $0.01\ \text{mm}$ ,齿条实物与单齿设计尺寸如图 6 所示。由于齿条表面与 4.1 节中的金属板表面情况基本一致,保持在相同的环境光照、设备等外部条件下,光条成像质量综合评价模型相同。以不同的曝光时间点(含 4.1 节中的 5 个曝光时间)依次进行高精度齿条表面轮廓的三维测量,测量结果如图 7 所示,为展示方便仅以第 7 齿的测量为例。选择重构轮廓与设计轮廓的平均残差平方和  $R_{\text{ssa}}$  作为测量精确程度的衡量指标。图 7(a)、7(b)分别为不同曝光时间点齿条三维重构结果和  $R_{\text{ssa}}$  值变化情况。

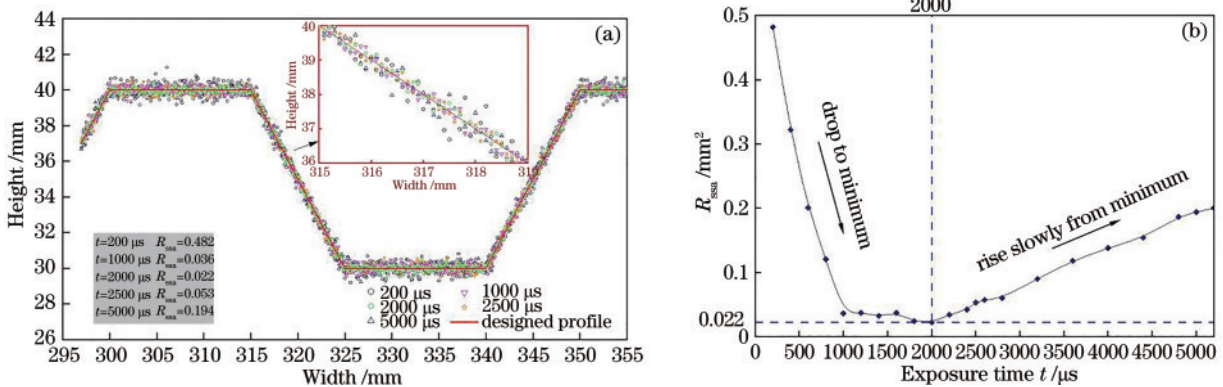


图 7 高精度齿条三维测量结果(以第 7 齿为例)。(a) 齿廓三维重构;(b)  $R_{\text{ssa}}$  随  $t$  变化

Fig. 7 3D measurement results of 7<sup>th</sup> tooth in high-precision rack. (a) 3D reconstruction of tooth profile; (b)  $R_{\text{ssa}}$  varies with  $t$

#### 4.3 质量评价对比实验

为了进一步对比验证所提方法的质量评价性能,将其与基于加权能量集中度的评价方法<sup>[9]</sup>(方法 1)、基于光条信度的评价方法<sup>[12]</sup>(方法 2)、基于归一化光条成像模型的评价方法<sup>[15]</sup>(方法 3)进行比较。分别采用上述方法对渐变曝光时间下采集的高精密齿条(图 6)表面光条图像进行质量评价,对评价出的最优光条图像采用相同的后处理方法,重构出齿条的轮廓。通过比较重构齿廓与设计齿廓之间的  $R_{\text{ssa}}$  值,确定不同方法光条质量评价性能。方法 1 评价出曝光时间在  $2600\sim 3200\ \mu\text{s}$  内的为优质光条图像,其加权能力集中度因子( $\alpha \approx 4.5$ )最大。方法 2 评价出曝光时间在  $800\sim 1800\ \mu\text{s}$  内的为优质光条图像,其信度评价灰度

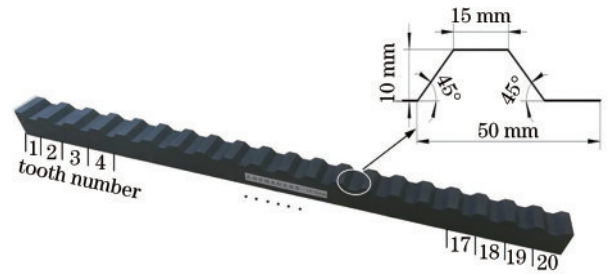


图 6 高精度齿条

Fig. 6 High-precision rack

从测量结果可以看出:曝光时间  $t$  在  $200\sim 1200\ \mu\text{s}$  内, $R_{\text{ssa}}$  从较大值骤降;在  $1200\sim 2400\ \mu\text{s}$  内, $R_{\text{ssa}}$  值偏小且稳定, $t$  为  $2000\ \mu\text{s}$  时, $R_{\text{ssa}}$  最小( $0.022$ ),光条成像质量最佳,测量精度最高;而在  $2400\sim 5000\ \mu\text{s}$  内, $R_{\text{ssa}}$  缓慢攀升。 $R_{\text{ssa}}$  值由小到大依次对应的 4.1 节中的曝光时间点为  $1000$ 、 $2500$ 、 $5000$ 、 $200\ \mu\text{s}$ ,该顺序与 4.1 节中的光条质量综合评价模型获得  $E$  值从大到小所对应曝光时间顺序完全一致。另外, $R_{\text{ssa}}$  值偏小所对应的曝光时间范围( $1200\sim 2400\ \mu\text{s}$ ),正好处在 3.1 节评价出的优质光条成像曝光时间范围( $1200\sim 2700\ \mu\text{s}$ )内。该结果进一步验证了本文光条成像质量多参数综合评价方法的有效性。

( $R \approx 160$ )、评价信度( $D \approx 2100$ )均最大。方法 3 评价出曝光时间在  $2200\sim 3000\ \mu\text{s}$  内的为优质光条图像,该范围内图像的平均光条中心灰度值( $L_{\text{laser}} \approx 210$ )增至最大,而后趋于平稳。结合 4.2 节中  $R_{\text{ssa}}$  随曝光时间变化图 7(b),可以得到由本文方法和方法 1、方法 2、方法 3 评价出的优质光条图像重构出的齿廓与设计齿廓之间的  $R_{\text{ssa}}$  值的情况,结果见表 4。

从结果可以看出:优质光条图像重构齿廓  $R_{\text{ssa}}$  值变动范围由小到大依次为本文方法、方法 3、方法 1、方法 2; $R_{\text{ssa}}$  值最小为  $0.022$ ,可由本文方法和方法 2 评价出的优质光条图像重构获得。由此可见,相较于其他三种方法,本文所提方法的评价可靠程度最好,评价准确性最高。

表 4 不同方法评价结果对比

Table 4 Comparison of evaluation results of different methods

Method	Relevant evaluation parameter	Exposure time $t/\mu\text{s}$	Variation range of $R_{\text{ssa}}$
Method 1	$\alpha \approx 4.5$	2600~3200	0.057~0.090
Method 2	$R \approx 160, D \approx 2100$	800~2000	0.022~0.120
Method 3	$L_{\text{laser}} \approx 210$	2200~3000	0.034~0.060
Proposed method	$3.81 \leq H \leq 4.10, 0.52 \leq C \leq 0.56,$ $0.95 \leq \beta \leq 1.00$	1200~2400	0.022~0.042

## 5 结 论

为量化、全面地评价线结构光条成像质量,开展了多参数光条成像质量综合评价方法研究。首先依次从图像一维熵、局部对比度和光条清晰度三方面特征,对不同曝光时间下采集到的系列光条图像进行特征分析;在此基础上,以系列光条图像的光心提取精度为依据,反向评价光条成像质量,分析多特征参数随光心提取精度变化规律,并间接以多特征参数实现光条成像质量的综合评价;最后,构建了多参数综合量化评价模型。光条质量评价实验、高精度齿条测量实验和质量评价对比实验表明:相比现有其他三种先进方法,本文所提评价方法更加准确、有效,评价出的优质光条图像处理得到高精度齿条的三维测量结果,其测量精度最高, $R_{\text{ssa}}$ 值最小仅为0.022。

在测量环境和材质确定的情况下,该研究能很好地满足光条成像质量评价的需求。而线结构光测量面临越来越多动态环境下的挑战,因此,如何根据测量环境或材质变化自适应完成光条成像质量评价成为需要进一步研究的问题。

### 参 考 文 献

- [1] Barone S, Paoli A, Rationale A V. Optical tracking of a tactile probe for the reverse engineering of industrial impellers[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(4): 041003.
- [2] 王维, 王杰, 黄易杨, 等. 基于偏振透射结构光的透明物体表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1812002.  
Wang W, Wang J, Huang Y Y, et al. Surface defect detection in transparent objects using polarized transmission structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812002.
- [3] Sun J H, Liu Z, Zhao Y T, et al. Motion deviation rectifying method of dynamically measuring rail wear based on multi-line structured-light vision[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 25-32.
- [4] Wu B, Xue T, Zhang T, et al. A novel method for round steel measurement with a multi-line structured light vision sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(2): 025204.
- [5] 李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112004.  
Li Z J, Cui H H, Liu C Y, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112004.
- [6] 解则晓, 朱瑞新, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004003.  
Xie Z X, Zhu R X, Zhang A Q. Extrinsic parameters calibration of three-dimensional measurement system for ultra-large scale line-structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004003.
- [7] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 轮廓测量系统钢轨纵向标定方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1012004.  
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Rail longitudinal calibration method for profile measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1012004.
- [8] 李伟明, 梅枫, 胡增, 等. 线激光光条中心内部推进提取算法[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1104002.  
Li W M, Mei F, Hu Z, et al. Internal propulsion algorithm for extracting center of line laser stripe[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1104002.
- [9] 李伟仙, 娄小平. 基于加权能量集中度的光条成像质量评价方法研究[J]. 光学技术, 2017, 43(4): 305-308.  
Li W X, Lou X P. Research on imaging quality evaluation of optical strip by weighted energy concentration[J]. Optical Technique, 2017, 43(4): 305-308.
- [10] 赵博华, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量系统的图像照度质量评价方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(4): 448-451.  
Zhao B H, Wang B X, Luo X Z. Illumination quality evaluation method for images sampled by a 3-D measuring system based on light-sectioning[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(4): 448-451.
- [11] 王一波, 柳建. 面向三维测量的光刀图像质量评价研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 768-772.  
Wang Y B, Liu J. Laser stripe image quality assessment method for 3D measurement[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 768-772.
- [12] 李涛涛, 杨峰, 李策, 等. 基于光条信度评价的线结构光传感器曝光时间优化[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0112005.  
Li T T, Yang F, Li C, et al. Exposure time optimization for line structured light sensor based on light stripe reliability evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0112005.



- 0112005.
- [13] 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, 35(6): 85-89, 117.  
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, 35(6): 85-89, 117.
- [14] 贾振元, 王灵丽, 刘巍, 等. 互参考激光光条图像质量评价[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3041-3050.  
Jia Z Y, Wang L L, Liu W, et al. Cross-referenced image quality assessment for laser stripes[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(11): 3041-3050.
- [15] 刘超, 段良君, 娄小平, 等. 激光扫描测头自适应调整方法研究[J]. 工具技术, 2016, 50(6): 89-93.  
Liu C, Duan L J, Lou X P, et al. Self-adaptive adjustment method for laser scanning probe[J]. Tool Engineering, 2016, 50(6): 89-93.
- [16] 徐晓睿, 戴明, 尹传历. 基于小波变换的 RL 湍流退化图像复原算法[J]. 液晶与显示, 2017, 32(10): 822-827.  
Xu X R, Dai M, Yin C L. RL turbulence degraded image restoration algorithm based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(10): 822-827.
- [17] Zhang X F, Wu H F, Ma Y. A new auto-focus measure based on medium frequency discrete cosine transform filtering and discrete cosine transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2016, 40(2): 430-437.
- [18] 张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 605-610.  
Zhang L X, Sun H Y, Guo H C, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 605-610.
- [19] Steger C. Unbiased extraction of curvilinear structures from 2D and 3D images[D]. Munich: Fakultät für Informatik, Technische Universität München, 1998.
- [20] 李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071201.  
Li T T, Yang F, Li S G, et al. Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071201.
- [21] He L Y, Wu S S, Wu C Y. Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor[J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 823-832.