

基于光条信度评价的线结构光传感器曝光时间优化

李涛涛^{1,2}, 杨峰¹, 李策¹, 方亮¹

¹ 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

² 萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055

摘要 研究了基于线结构光光条信度评价的相机曝光时间优化方法,将信度评价结果作为曝光时间优化的参考指标。结合光条切面服从高斯分布的特点,对已有光条信度评价模型进行改进,构建高斯信度评价模型;利用亚像素光条中心提取方法对不同曝光时间下采集到的光条图像进行光心提取,提取结果经高斯信度评价模型评价得到评价信度值 C 和灰度值 R ;分析曝光时间 t 对评价结果的影响机理,构建 t - C 、 t - R 变化模型,并通过分析变化模型得到了相机最优曝光时间。实验以 230 lx 光强下的高精密齿条和水泥路面模型作为测量对象,结果表明:曝光时间优化后的测量更准确且效率更高,单光条测量的平均残差平方和约为 0.03 mm^2 ,重构模型的平均构造深度与真实模型仅差 9.8%。

关键词 测量; 线结构光传感器; 结构光条; 高斯信度评价模型; 曝光时间

中图分类号 TG806; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0112005

Exposure Time Optimization for Line Structured Light Sensor Based on Light Stripe Reliability Evaluation

Li Taotao^{1,2}, Yang Feng¹, Li Ce¹, Fang Liang¹

¹ School of Mechanical Electronic & Information Engineering,

China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China;

² School of Electromechanical Engineering, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China

Abstract Optimization methods of camera's exposure time based on line structured light stripe reliability evaluation are studied, and the reliability evaluation results are used as reference indexes for optimization of exposure time. Firstly, existing light stripe reliability evaluation model is improved by combination with the characteristics that light stripe cross section obey Gaussian distribution, and then Gaussian reliability evaluation model is constructed. With the extraction method of sub-pixel light stripe center, light stripe centers are extracted from stripe images acquired with different exposure times. Extraction results are evaluated by Gaussian reliability evaluation model to obtain the values of evaluation reliability C and gray level R . Then, the influence mechanism of exposure time t on the evaluation results are analyzed respectively. Variation models of t - C and t - R are built, and the camera's optimal exposure time is finally obtained through analysis of variation models. Experiments take the high-precision spline and cement pavement model under light intensity of 230 lux as an experimental measurement object. Results show that measurement with the optimized exposure time is more reliable and more efficient. Mean residual sum of squares of the single light strip measurement is about 0.03 mm^2 . The average texture depth of reconstructed model is only 9.8% away from actual model.

Key words measurement; line structured light sensor; structured light stripe; Gaussian reliability evaluation model; exposure time

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 100.2000

收稿日期: 2017-07-31; 收到修改稿日期: 2017-08-27

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM16KFD03, SKLCRSM16KFD04)、北京市自然科学基金(8162035)、贵州省科技计划(黔科合 GZ 字[2015]3020)

作者简介: 李涛涛(1988—),男,博士研究生,主要从事路面、地下管道三维检测方面的研究。

E-mail: ltaotao1988@126.com

导师简介: 杨峰(1968—),男,博士,教授,主要从事路面、管道三维检测和地质雷达方面的研究。

E-mail: yangf@cumtb.edu.cn

1 引 言

线结构光三维测量以其成本低、精度高和结构简单等特点被广泛应用于逆向工程、工业制造和隧道桥梁检测等领域^[1-3]。结构光测量效率及准确性受传感器性能、参数标定方法、光条提取方法和外界光照环境等诸多因素的影响,其中传感器的相机曝光时间直接影响着光条图像质量,是影响测量效率和准确性的首要因素,因此研究线结构光传感器曝光时间优化对提高线结构光测量效果具有重要的作用。

为进一步提高线结构光测量精度,国内外学者开展了大量的传感器性能提升、标定方法及光条提取算法创新和改进等方面的研究^[4-6];但通过光条图像成像参数(如曝光时间和增益)优化来提高光条图像质量和测量精度的研究相对较少。马泽龙等^[7-9]基于图像的直方图特性对相机的自动曝光方法进行了研究;陆尧等^[10-11]从硬件层面出发研制出自适应曝光时间的 CCD、CMOS 相机;王红睿等^[12-14]提出了变光照环境下的相机参数自适应调整或估计算法;焦阿敏等^[15-16]针对光条图像采集进行了自适应动态成像参数调整方法的研究。相位测量轮廓术(PMP)在原理和形式上同结构光测量极为相似^[17],Zhong 等^[18]为降低反射率多变的物体表面对 PMP 测量结果的影响,研究了相机的最优曝光时间标定方法;Ekstrand 等^[19]对测量前不同曝光时间下采集的纯白光照射图像进行分析,以确定被测物表面反射率,进而标定最优曝光时间。由此可知,已有研究

极少专门针对线结构光条图像成像参数的自适应调整或优化进行研究,以现有普通成像的自适应调节或标定方法所得曝光时间采集的光条图像并不一定是最佳光条提取结果所需的图像。

本文基于线结构光光条信度评价研究了相机曝光时间的优化方法^[20-22],以期获得最佳光条提取结果所需的最优曝光时间。该方法利用改进的光条高斯信度评价模型对亚像素光条中心提取结果进行了可靠性评价,研究了信度评价结果受曝光时间的影响机理,最终由曝光时间与信度评价结果的变化模型得到最佳的相机曝光时间。

2 光条图像特征

线结构光三维测量原理是激光三角测量,利用预先标定的相机、激光器和被测物的空间三角位置关系反算光条照射位置的三维坐标。测量装置由相机和激光器组成,其中相机曝光时间的长短是影响三维测量精度和效率的主要因素之一。曝光时间过短($100\ \mu\text{s}$)致使光条图像欠曝,光条在不同位置的灰度和宽度呈现明显的不均匀性[图 1(a)],光条中心提取位置可靠性较差。曝光时间过长($10000\ \mu\text{s}$)导致光条图像过曝和帧率下降,光条能量增加的同时引入了更多的噪声[图 1(c)],光条中心提取受噪声的影响较大,测量速度降低。为此,如何确定相机最佳曝光时间($2150\ \mu\text{s}$)以采集最佳光条图像[图 1(b)],成为精确、快速的线结构光三维测量所要解决的问题。图中 A、B 代表光条上灰度、宽度不均匀区域,C、D、E 代表引入的噪声区域。

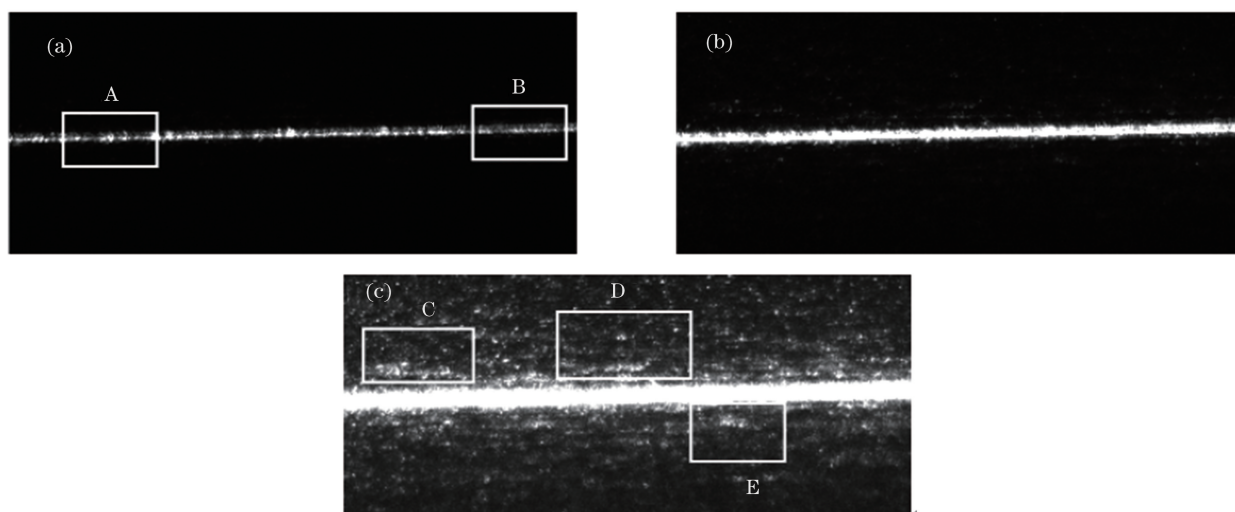


图 1 光条图像。(a)欠曝($100\ \mu\text{s}$);(b)最佳曝光($2150\ \mu\text{s}$);(c)过曝($10000\ \mu\text{s}$)

Fig. 1 Light stripe images. (a) Under exposure ($100\ \mu\text{s}$); (b) optimal exposure ($2150\ \mu\text{s}$); (c) over exposure ($10000\ \mu\text{s}$)

3 光条信度评价

相机曝光时间的长短能直观地从光条图像中反映出来,因此可以通过分析光条特点及其变化规律来优化相机的曝光时间。光条信度评价是对光条中心提取的结果进行准确度及可靠度评价,通过研究光条信度与曝光时间之间的关系,来确定相机的最佳曝光时间。

3.1 光条信度评价依据

线结构光条图像生成的过程实质上是光条能量转换的过程。相机接收到光强为 $I(x, y)$ 的入射光条依次执行光电转换、电荷存储、电荷转移和增益放大 4 个步骤,最终得到数字化光条亮度图像 $g(x, y; t)$ 。 $I(x, y)$ 是环境反射光强 I_a 和结构光反射光强 I_β 的总和,即

$$I(x, y) = I_a + I_\beta. \quad (1)$$

光条的 4 步转换可表示为

$$g(x, y; t) = \alpha\rho R I(x, y) S t = \alpha\rho R (I_a + I_\beta) S t, \quad (2)$$

式中 R 为 CCD 响应度, S 为 CCD 面积, t 为曝光时间, ρ 为电荷转移效率, α 为电荷增益放大倍数。由 (2) 式可知:在 CCD 不饱和且光照不变的情况下,采用固定光强的激光器对材质相同的物体表面进行结

构光三维测量时,光条上某一固定点 (x_c, y_c) 的灰度值 $g(x_c, y_c; t)$ 与曝光时间 t 呈线性关系,即曝光时间越长,光条固定点灰度值越大,代表此处能量越强。

理想的线结构光光条切面呈高斯分布,高斯顶点为理想的光条中心点,其灰度值最大、能量最强。当提取光条中心能量越接近理想光条中心能量值,其可信度越高。但实际反射光条截面并非理想的高斯分布,因此不能仅以单点能量作为信度评价指标,以提取中心所在切面的能量总和作为该处能量更具评判力。由 (2) 式可知,随着曝光时间的增加,光条逐渐充盈,光条提取中心所在光条切面总能量增加,提取位置越发可靠。

3.2 光条高斯信度评价模型

光条信度评价方法是对光条中心位置提取的可靠性进行评价。为了提高评价方法的准确性,在文献[19-20]所提光条信度评价原理的基础上进行改进,构建了光条高斯信度评价模型。该模型充分利用光条切面能量符合高斯分布的特点,以每个光条切面的高斯拟合结果 (μ, σ) 来重新定义光条宽度,其中 μ, σ 分别为拟合高斯函数的均值和方差,此外增加了评价灰度作为评价指标,以获得更可靠的评价结果。光条高斯信度评价具体流程如图 2 所示。

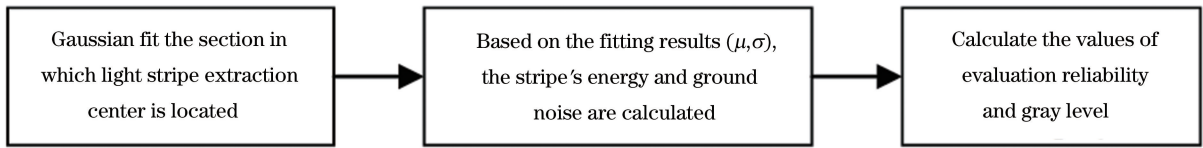


图 2 光条高斯信度评价流程

Fig. 2 Process of light stripe Gaussian reliability evaluation

1) 高斯拟合

以光条中心提取结果 c 及对应的灰度值 p_c 作为一维非线性高斯拟合的初值,利用最小二乘法得到拟合高斯模型 $G(x)$ 为

$$G(x) = p_i \exp[-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)], \quad (3)$$

式中 x 为像素点坐标, μ 为高斯拟合后的光条中心亚像素坐标, p_i 为拟合光条中心的灰度值。

2) 光条能量、基底噪声计算

依据高斯型切面 95% 的能量集中在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 范围内的特点,将光条宽度定为 4σ ,光条能量 E_s 为宽度范围内所有像素点灰度值之和,即

$$E_s = \sum_{x=\mu-2\sigma}^{\mu+2\sigma} G(x). \quad (4)$$

基底噪声会导致光条信度降低,其能量 E_N 以光条宽度两侧再外扩 2σ 范围内像素点灰度值之和,

可表示为

$$E_N = \sum_{x=\mu-4\sigma}^{\mu-2\sigma} G(x) + \sum_{x=\mu+2\sigma}^{\mu+4\sigma} G(x). \quad (5)$$

3) 光条评价信度、灰度计算

光条上某点所在切面去除基底噪声能量后剩余的能量为该点的评价信度值 C ,可表示为

$$C = E_s - E_N. \quad (6)$$

光条评价信度值只能对光条的能量总和进行评价;对于散射严重的区域,光条较宽,信度值偏大,仅以光条信度无法准确地对提取中心可靠性进行评价,因此增加了评价灰度 R 作为光条信度评价指标, R 可表示为

$$R = \frac{C}{\omega} = \frac{E_s - E_N}{\omega}, \quad (7)$$

式中 ω 为取整后的光条宽度, $\omega = 4\sigma$, 评价灰度 R

实际为光条宽度范围内像素的平均能量。

4 相机曝光时间优化

在进行相机曝光时间优化研究之前,先使用相机依次以不同曝光时间对外界照度条件恒定(230 lx)的平整水泥表面光条图像进行采集,曝光时间范围为 200~3800 μs、间隔为 20 μs。将采集到的光条图像作为原始图集 U , U 可表示为

$$U = \{A_i \mid i = t/20 - 9, 200 \leq t \leq 3800\}, \quad (8)$$

式中 A_i 为第 i 张光条图像, t 为曝光时间。

4.1 亚像素光条中心位置提取

光条中心位置提取是光条信度评价的第一步,提取结果直接影响着信度评价的可靠性。光条中心位置提取通常针对的是变化场景下、不同位置的光条图像,而文中面向的是相同场景下、同一位置、不同曝光时间的光条图集 U ,图集的光条图像极为相似。对图集 U 中的光条图像进行相关性分析可得

$r =$

$$\frac{\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})(C_{mn} - \bar{C})}{\sqrt{[\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2][\sum_m \sum_n (C_{mn} - \bar{C})^2]}} \quad (9)$$

式中 B, C 为图集 U 中的任意两张光条图像, r 为两张图像的相关系数, m, n 为图像的长、宽像素。图集中相邻两幅图像的相关系数 r 的均值为 0.998,差别最大的两幅图像(曝光时间分别为 200 μs 和 3800 μs)的 $r = 0.755$,因此图集的光条图像有极大的相关性。为此,结合图集的这一特点,提出了针对图集 U 的亚像素光条中心位置提取方法。

在曝光时间较短的情况下,光条图像中除光条之外基本为黑色[图 1(a)],此时的光条中心基本为每列(行)上像素值最大的位置,光条中心极易提取。但随着曝光时间的延长,光条逐渐充盈,噪点增多[图 1(b)],光条图像的部分列(行)上出现多个最大像素值位置;采用前述方法无法得到准确的中心位置,只能选用如 Hessian、方向模板等复杂的方法。由于相邻图像的相关性极大,实际光条中心在整个光条图集中变化相对较小,因此可以利用从最低曝光时间图像中提取到的光条中心作为整个图集光条中心提取的初值,每次提取的结果作为下一张光条图像提取的初始位置。具体的光条中心位置提取流程如图 3 所示,具体为:1)以前一张图像的光条中心提取结果作为约束条件,对初始中心两侧一定范围

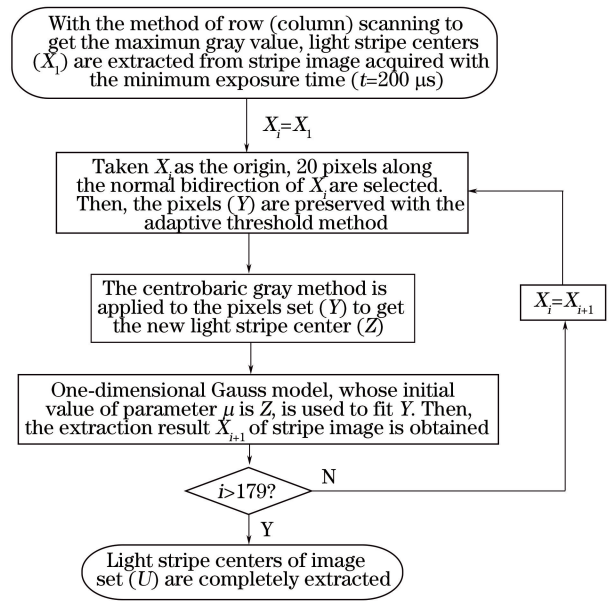


图 3 亚像素光条中心位置提取流程

Fig. 3 Extraction process of sub-pixel light stripe center position

内(法线双向 20 个像素点内)的像素采用自适应阈值法,得到符合条件的像素集 Y ;2)对像素集 Y 采用灰度重心法,求取新的光条中心位置 Z ;3)以 Z 为初值,采用一维高斯模型对 Y 进行拟合,由最小二乘法得到高斯模型参数,高斯顶点位置即为光条中心提取位置。

4.2 光条信度评价及曝光时间优化

采用第 3.2 节中构建的光条高斯信度评价模型对光条图集 U 中光条提取中心位置进行信度评价。为了分析曝光时间对信度评价结果的影响机理,以光条上某一固定切面位置在不同曝光时间图像中的中心提取结果作为信度评价目标,观测其信度评价结果随曝光时间的变化规律。为了全面掌握该机理,选取了光条上多个典型的切面位置作为研究目标,如图 4 所示的 $p_1 \sim p_{16}$ ($t = 200 \mu s$ 时的采集图像),其中包含光能量充盈(如 p_9, p_{14})、欠充盈(如 p_8, p_{10})和不充盈(如 p_2, p_3, p_{16})的 3 类位置。

对光条图集中所有上述典型位置进行光条中心提取,并对提取结果进行信度评价,评价结果如图 5 所示,其中图 5(a)、(b)分别为各典型位置光条提取中心评价信度 C 和评价灰度 R 随曝光时间 t 的变化规律($t-C, t-R$)。

通过观察以上信度评价参数随曝光时间变化的统计结果发现:随着曝光时间的增加,各位置上光条中心提取结果的评价信度和评价灰度呈增长趋势,并逐步趋于平稳,近似于对数增长。其中评价灰度

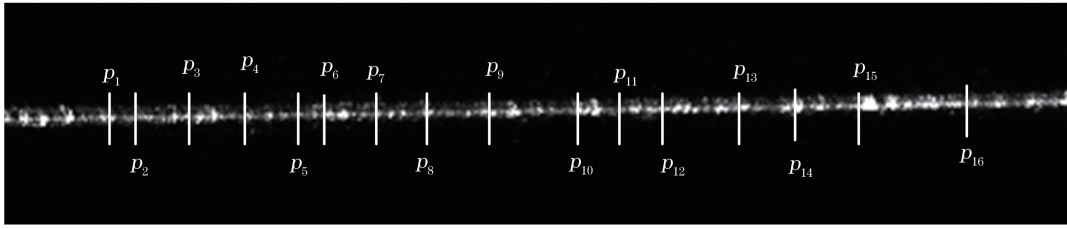


图 4 光条上典型切面位置($p_1 \sim p_{16}$)

Fig. 4 Positions of typical sections (p_1-p_{16}) on the light stripe

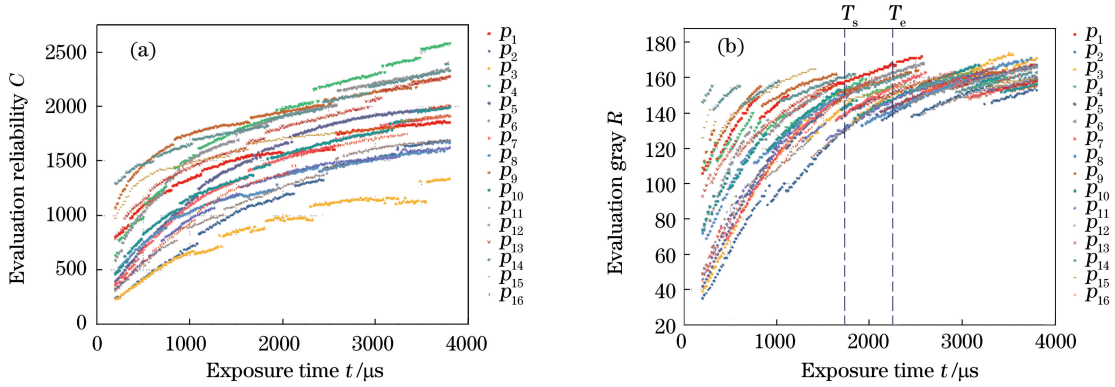


图 5 典型切面光条中心信度评价结果。(a) C 随 t 变化;(b) R 随 t 变化

Fig. 5 Reliability evaluation results of typical sections' light stripe centers. (a) C varies with t ; (b) R varies with t

随曝光时间的增长快慢受初始光条能量充盈程度的影响,其中不充盈位置的增长最快,其次为欠充盈、充盈位置,但最终均趋于平稳;评价信度随曝光时间的变化趋势较接近,基本呈现出对数函数的变化规律。为此,利用非线性对数拟合信度评价结果(图 6)构建评价信度和评价灰度随曝光时间的变化模型:

$$\begin{cases} C_i(t) = a_i - b_i \ln(t + c_i) \\ R_i(t) = \begin{cases} M, & \text{section position is full of light energy,} \\ d_i - e_i \ln(t + f_i), & \text{else} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $200 \mu s \leq t \leq 3800 \mu s$, i 为光条图像第 i 行(列), $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ 为拟合对数函数参数。当切面充盈时, $150 \leq M \leq 170$; 当切面欠充盈或不充盈时, $20 \leq R_i(t) \leq 170$ 。

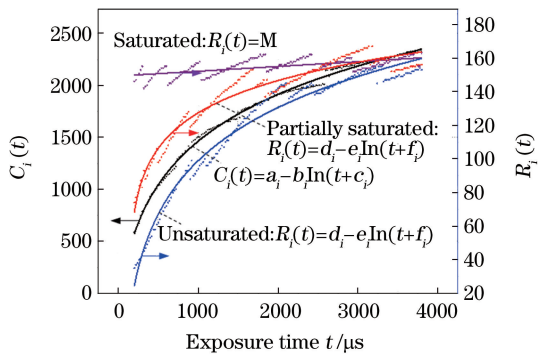


图 6 对数拟合构建 $C_i(t), R_i(t)$ 变化模型

Fig. 6 Building $C_i(t), R_i(t)$ variation models with logarithmic fitting

由变化模型可以看出:随着曝光时间的增加,光条上任意位置提取中心的评价灰度 R_i 在 $t = 1750 \sim 2250 \mu s$ 段内逐步平稳到 $R = 160$ 左右,而不同位置提取中心的评价信度 C_i 都将逐步平稳到不同的极限值 $C_{i \max}$ 。为了进一步研究评价信度 C_i 随曝光时间 t 的增加趋近 $C_{i \max}$ 的程度,对 $C_i(t)$ 求二阶导数可得

$$I_i(t) = [C_i(t)]'' = \frac{b_i}{(t + c_i)^2} \quad (11)$$

求取所有典型切面位置的 $I_i(t)$, $I_i(t)$ 在 $200 \mu s \leq t \leq 3800 \mu s$ 变化过程如图 7 所示。由图可以看出:曝光时间增加到 $T_s \sim T_e$ 范围时,所有 $I_i(t)$ 均基本完成收敛,意味着在 $T_s \sim T_e$ 范围内,各位置提取中心的评价信度值 C_i 基本都趋于各自极限值 $C_{i \max}$ 。

由此可见,在外界照度恒定、待测物材质一定的

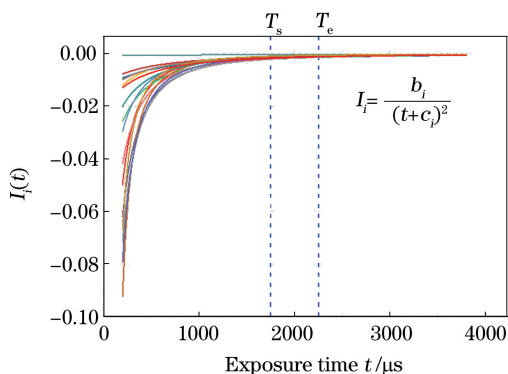


图 7 典型切面位置的 I 随 t 变化情况

Fig. 7 I of typical section positions varies with exposure time t 情况下,光条提取中心信度评价指标(C 、 R)随曝光时间(t)的增加都将收敛到某个恒定的值,且收敛位置的曝光时间相同,因此可将此曝光时间作为该条件下最优的相机曝光时间。如在对外界光强为 230 lux 的平整水泥表面的结构光条进行采集时,由于光条提取中心的评价信度和评价灰度均在曝光时间 1750~2250 μs 范围内完成收敛,因此该范围为该条件下最优的相机曝光时间范围。

5 实验结果

为了验证传感器的相机曝光时间优化后对测量精度和速度的影响,依次开展了单一光条精度实验和模型测量实验。所有实验均在如图 8 所示的线结构光三维测量平台上进行,外界光照强度为 230 lux,平台主要由相机、激光器和运动台组成。相机配有 12 mm 焦距光学镜头,分辨率为 1280×1024 ;激光器波长为 660 nm,功率为 100 mW,扇形角为 75° ;运动台可往返运动,实验测量对象(如:高精度齿条、水泥路面模型)放置在运动台面上。

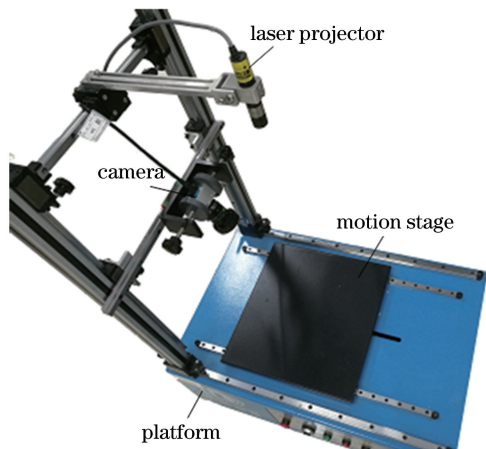


图 8 线结构光三维测量平台

Fig. 8 Platform of line structured light 3D measurement

5.1 单光条精度实验

单光条精度实验是从局部单一光条出发,比较不同曝光时间对单一光条测量精度的影响。实验以高精度的钢制齿条为测量对象,齿条表面氧化成黑色,加工误差为 0.01 mm,齿条实物及单齿设计尺寸如图 9 所示。

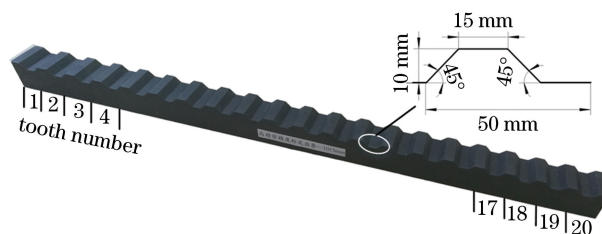


图 9 高精度齿条

Fig. 9 High-precision rack

线结构光垂直照射到静止齿条齿面上;在曝光时间 200~3000 μs 范围内,斜侧相机曝光时间每增加 50 μs 采集一张齿面光条图像;以 4.1 节的方法提取所有光条图像的光条中心位置,再由三角测量单应性关系换算出齿条轮廓的三维测量结果。以齿条第 9 齿测量为例,图 10(a)为曝光时间 t 分别为 500,2000 μs 时测得的轮廓,图 10(b)为不同曝光时间实测轮廓与设计轮廓的平均残差平方和(R_{SSA})分布情况,由平方根模型(Belehradek)拟合得到 R_{SSA} 随 t 的变化函数。由于高精度齿条与第 4 节的水泥表面具有相近的反射系数(0.15~0.2),且外界照度条件相同(230 lux),按该条件下曝光时间优化结果, t 在 1750~2250 μs 范围内已获得较高且稳定的测量精度。由图 10(b)可知:随着曝光时间 t 的增加,平均残差平方和逐步减小,并最终趋于平稳;即随着 t 的增加,测量结果逐步接近实际轮廓,测量精度越来越高。当曝光时间为 2000 μs 左右时,测量已经达到较高精度且基本趋于稳定,因而验证了上述范围为该条件下最优的相机曝光时间范围。

5.2 模型测量实验

模型测量实验从全局测量出发,比较不同曝光时间对全局测量精度和效率的影响。测量对象为 15 cm \times 31.5 cm 的水泥路面模型,模型表面整体平整,局部存在小范围的典型路面破损,如裂缝、坑洼和拥包等。传感器分别以数个典型的曝光时间 t (200,2000,5000,10000 μs) 对模型进行测量,测量结果重构如图 11(a)~(d)所示;图 11(e)、(f)为局部典型破损(裂缝、坑洼)放大对比图。比较结果可以发现,典型破损在 $t = 2000 \mu\text{s}$ 时轮廓最为完整、

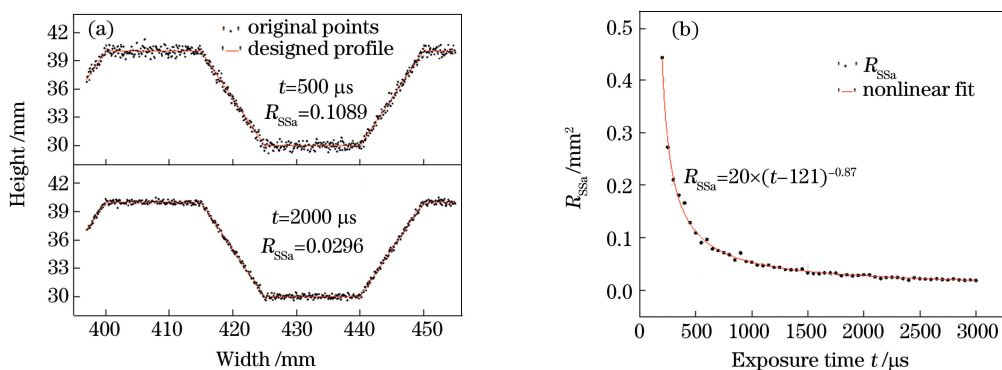


图 10 测量结果。(a)测得的第 9 齿轮廓;(b) R_{ssa} 随 t 变化

Fig. 10 Measurement results. (a) Measured profiles of the 9th tooth; (b) R_{ssa} varies with t

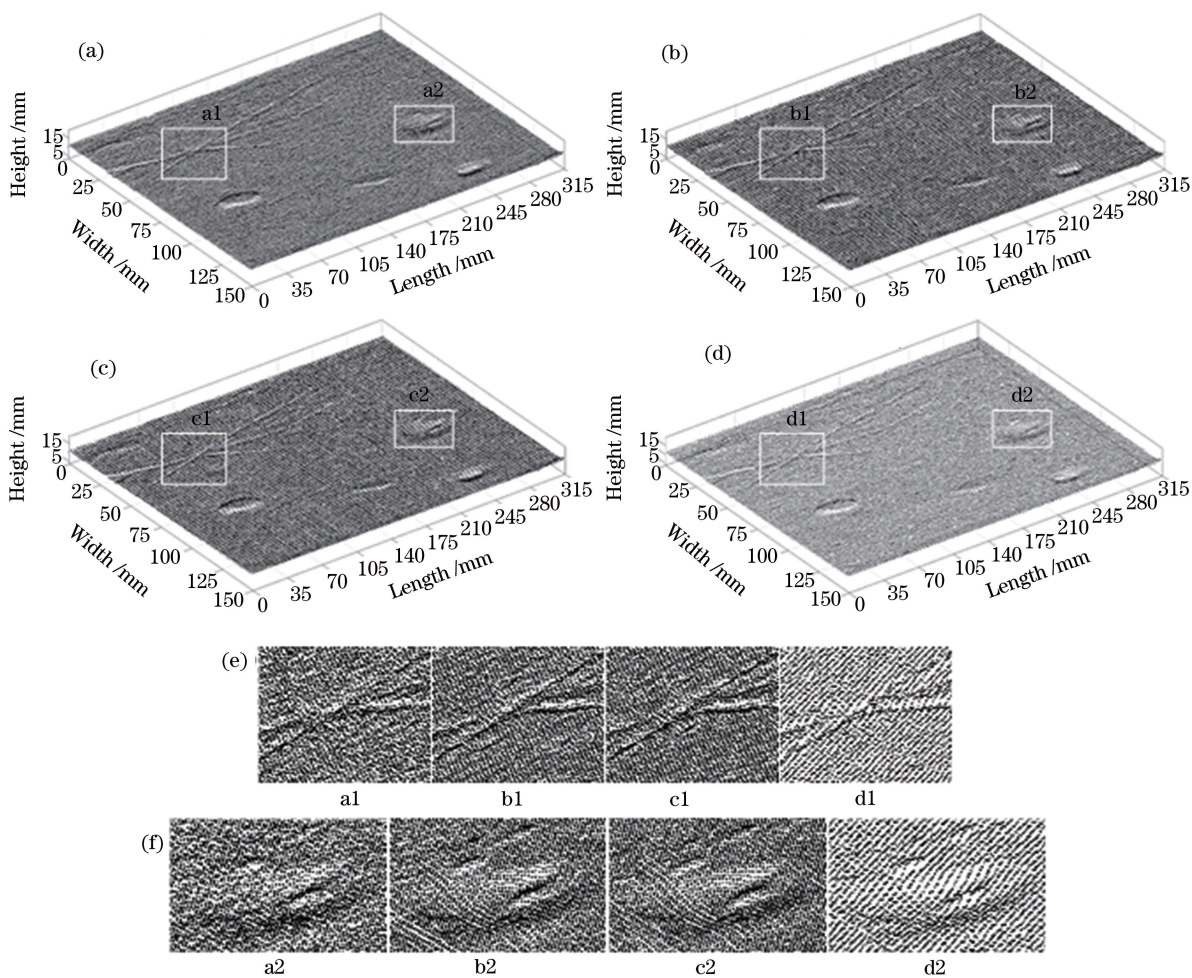


图 11 模型测量结果对比。(a)重构模型 1($t=200 \mu s$);(b)重构模型 2($t=2000 \mu s$);

(c)重构模型 3($t=5000 \mu s$);(d)重构模型 4($t=10000 \mu s$);(e)裂缝区域;(f)坑洼

Fig.11 Comparison of model measurement results. (a) Reconstructed model 1 ($t=200 \mu s$);

(b) reconstructed model 2 ($t=2000 \mu s$); (c) reconstructed model 3 ($t=5000 \mu s$);

(d) reconstructed model 4 ($t=10000 \mu s$); (e) cracks area; (f) potholes

清晰,其他曝光时间 t 下均存在不同程度的信息缺失、模糊的情况。

为量化比较不同曝光时间下的测量效果,以路面平均构造深度 T_D 、重构道数 N 作为指标,对真实

模型及各个重构模型进行参数化评价。 T_D 是路面粗糙度的评价指标,指一定面积的路表面凹凸不平的开口孔隙的平均深度,在此用于比较各个重构模型与真实模型的差别程度,进而比较重构精度。真

实模型 T_D 可以通过电动铺沙的方式测得, 重构模型 T_D 由双向均值法求得, 即

$$T_D = \frac{1}{ab} \sum_{u=1}^a \sum_{v=1}^b [\max(D) - D_{uv}], \quad (12)$$

式中 a, b 为重构模型行、列数, D_{uv} 为第 u 行、 v 列的高程信息。重构道数 N 为

$$N = f(t) \frac{l}{v}, \quad (13)$$

式中 l 为模型长度; v 为运动台往返速度; $f(t)$ 为相机帧率函数, 可表示为

$$f(t) = \begin{cases} f_c, & t \leq t_c \\ \frac{f_c}{1 + f_c(t - t_c)}, & t > t_c \end{cases}, \quad (14)$$

式中 t_c 为最大帧率下的最长曝光时间。当曝光时间 $t \leq t_c$ 时, 帧率为常量 f_c ; 当 $t > t_c$ 时, 帧率为曝光时间 t 的函数, t 与帧率 $f(t)$ 成反比。运动台往返速度 v 恒定, 以不同曝光时间对同一模型进行测量, 若 $t > t_c$ 时, t 越大, 采集到的数据道 N 越少, 测量效率降低, 重构模型精度较低。为了保证评价的有效性, 以上述曝光时间各进行 50 次测量实验, 测量结果参数化评价后取均值, 结果统计到表 1 中, 表中 $\delta = |T_{DActual} - T_{DModel}| / T_{DModel}$ 。

表 1 模型评价参数比较

Table 1 Comparison of model evaluation parameters

Parameter	Actual	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
T_D/mm	2.012	2.585	2.209	2.356	2.612
T_D error $\delta / \%$	0	28.5	9.8	17.1	29.8
Profile count N		628	632	602	311

由表 1 可知: 当曝光时间 $t = 2000 \mu\text{s}$ 时, 重构模型与真实模型的平均构造深度偏差最小 $\delta_{\min} = 9.8\%$; 曝光时间过短或过长, δ 值均较大, 测量精度降低、准确性不高; 此外, 当曝光时间 $t = 10000 \mu\text{s}$ 时, 完整的模型测量只获得 311 道重构轮廓数据, 为其他曝光时间下的 1/2 左右, 测量效率偏低。上述结果进一步验证: 当曝光时间较短或较长时, 受光条不均匀性或过曝噪声的影响, 测量准确性偏低; 当曝光时间过长时, 除高噪声之外, 测量帧率的降低也会影响测量的准确性和效率; 当曝光时间 $t = 2000 \mu\text{s}$ 时, 能获得最好的测量精度和速度。

6 结 论

为获得线结构光测量时的相机最优曝光时间, 基于线结构光光条信度评价对相机曝光时间优化进行了研究, 将光条信度评价结果直接作为曝光时间优化的参考指标。首先针对光条切面灰度高斯分布

的特点, 改进并构建了高斯信度评价模型; 之后由高斯信度评价模型对不同曝光时间下的亚像素光条中心提取结果进行信度评价, 评价结果量化成评价信度值 R 和灰度值 C ; 最后研究了曝光时间 t 对评价结果的影响机制, 由 $t-C$ 、 $t-R$ 变化模型得到最优的相机曝光时间。230 lux 光强下的单光条精度实验和模型整体测量实验表明: 曝光时间优化后的测量精度和效率更高, 结果更准确; 测量 R_{SSA} 稳定在 0.03 mm^2 左右, 重构模型平均构造深度与真实模型仅差 9.8%。

在环境光强和物体表面材质已知的情况下, 该研究能很好地满足结构光高精度、高效测量的需要。而实际测量多为变光照、多材质的情况下, 因此如何根据环境光强和材质情况自适应的选择预先优化的曝光时间成为需进一步研究的问题。

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] Zhang H M, Yang X C, Chen G G. 3D reconstruction of parts to be processed by laser remanufacturing robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2937-2944.
张海明, 杨洗陈, 陈高贵. 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2937-2944.
- [3] Zhan D, Yu L, Xiao J, et al. Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(4): 8664-8684.
- [4] Xie Z X, Liu J X. Calibration technology for line structured light sensor with large scale[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1214001.
解则晓, 刘静晓. 超大尺度线结构光传感器现场标定技术[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1214001.
- [5] Chen T F, Zhao J B, Wu X. New calibration method for line structured light sensor based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112004.
- [6] Cai H Y, Feng Z D, Huang Z H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. Chinese Journal of Lasers,

- 2015, 42(3): 0308006.
- 蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308006.
- [7] Ma Z L, Gao H B, Yu Y, *et al.* Auto exposure control for high frame rate camera using image histogram feature function[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 1026-1035.
- 马泽龙, 高慧斌, 余毅, 等. 采用图像直方图特征函数的高速相机自动曝光方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1026-1035.
- [8] Yang H T, Chang Y L, Wang J, *et al.* A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 841-848.
- 杨海涛, 常义林, 王静, 等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 841-848.
- [9] Shen X H, Liu J H, Chu G S. Auto exposure algorithm for aerial camera based on histogram statistics method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(3): 541-548.
- 申小禾, 刘晶红, 楚广生. 基于直方图分析的航空摄像机自动调光方法研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 541-548.
- [10] Lu Y, Yao S Y, Xu J T. Investigation on COMS image sensors based on adaptive-exposure[J]. Journal of Optoelectronics · Lasers, 2006, 17(11): 1321-1325.
- 陆尧, 姚素英, 徐江涛. 基于自适应曝光的 CMOS 图像传感器的设计与实现[J]. 光电子·激光, 2006, 17(11): 1321-1325.
- [11] Huang H, Zhou J. Auto-exposure for CCD camera based on FPGA[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 426-433.
- 黄辉, 周进. 基于现场可编程门阵列的 CCD 相机自动调光[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 426-433.
- [12] Wang H R, Tian Y T, Gu Q. Adaptive tuning methods for digital camera parameters under various illuminations[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1262-1267.
- 王红睿, 田彦涛, 顾庆. 变光照环境中的数字摄像机参数自适应调整算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(5): 1262-1267.
- [13] Kim H-W, Kwon S, Je-Kyo J, *et al.* Auto-exposure control method for a stereo camera robust to brightness variation[J]. International Journal of Control and Automation, 2014, 7(1): 321-330.
- [14] Guo H N, Cao J Z, Zhou Z F, *et al.* Fast automatic exposure approach for color digital camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1011003.
- 郭惠楠, 曹剑中, 周祚峰, 等. 彩色数字相机快速自动曝光方法[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1011003.
- [15] Jiao A M, Dong M L, Lou X P, *et al.* Self-adaptive adjustment method based on fuzzy control for imaging parameter of laser stripe image[J]. Tool Engineering, 2017, 51(5): 112-117.
- 焦阿敏, 董明利, 娄小平, 等. 光条图像成像参数的模糊自适应调整方法研究[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 112-117.
- [16] Shen H J, Wu Y F, Zhang H, *et al.* Structured light 3D scanning system based on dynamic parameter control[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2013, 33(6): 53-56.
- 沈杭锦, 吴以凡, 张桦, 等. 基于动态参数控制的结构光三维扫描系统[J]. 杭州电子科技大学学报, 2013, 33(6): 53-56.
- [17] Bian X T, Cheng J, Zuo F, *et al.* A method of 3D shape measurement based on alignment grating projection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011202.
- 边心田, 程菊, 左芬, 等. 基于光栅预校正的三维面形测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011202.
- [18] Zhong K, Li Z W, Zhou X H, *et al.* Enhanced phase measurement profilometry for industrial 3D inspection automation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9/10/11/12): 1563-1574.
- [19] Ekstrand L, Zhang S. Autoexposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 123603.
- [20] Wang S, Xu J Z, Zhang Y X, *et al.* Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1115001.
- 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, 31(11): 1115001.
- [21] 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.
- 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.
- [22] 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.