

结构光光条中心点信度评价方法与应用

王 顺 徐静珠 张益昕 张旭苹* 谢 飞

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210008)

摘要 结构光三维测量中,光条中心点的提取是极其重要的步骤。现有方法对结构光条中心点提取都仅仅是标志中心点的位置,而中心点位置的可信与否,并未提及。对于一些特殊场合应用,例如室外复杂情况的测量,需要确定测量结果的可信程度。如何评价光条提取的中心点的可信程度成为亟待解决的关键问题。针对这一问题,对光条模型进行实际分析,给出了更为合理的高斯模型为光条模型。在此基础上以光条截面归一化高斯模型能量和为信度评价依据,提出了结构光条中心点信度评价方案,同时进行了实验验证。结果表明,此评价结果可以有效地评价区分各种情况的光条中心点的可信程度,更加符合实际评价需求。

关键词 机器视觉;结构光条;高斯模型;信度评价

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1115001

Reliability Evaluation Method and Application for Light-Stripe-Center Extraction

Wang Shun Xu Jingzhu Zhang Yixin Zhang Xuping Xie Fei

(Institute of Optical Communication and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract In line structured light vision measurement, extraction of the light-stripe center is an extremely important step. The existing extraction methods simply give out the stripe center position. Few take it into account how reliable of the extraction result is. In some special occasions, such as outdoor measurement, the reliability of the measurement results is greatly needed. Therefore, how to evaluate the reliability of the stripe center becomes a key problem. A reliability evaluation method for light-stripe-center extraction has been proposed, which is on the basis of the total energy of stripe cross section normalized by Gaussian model. Experimental results show that this method can effectively evaluate stripe center reliability in different situations, and the result is more consistent with practical need.

Key words machine vision; structured-light stripe; Gaussian model; reliability evaluation

OCIS codes 150.1488; 150.1135; 100.2000

1 引 言

随着测量技术的发展,三维视觉测量由于具有非接触、动态响应快、系统柔性好等特点,广泛应用在工业、交通等精密测量现场^[1]。在结构光视觉检测中,获取结构光光条中心的高精度图像坐标是结构光视觉传感器校准及获得被测物体三维轮廓的关键步骤,也是测量的第一手信息。

常见的光条中心线提取方法,如极值法、灰度重

心法和方向模板法等^[2~5],算法简单,实时性强,但精度不高且大都对噪声敏感;而曲线拟合法^[6]、样条插值提取法^[7]和 Hessian 算法^[8,9]的稳健性好,可具有亚像素精度,但算法复杂度也较大。现有的光条中心提取方法输出结果都仅仅是表示中心点的位置。结构光三维视觉测量常常面临着复杂的情况,如大型室外测量时强的背景光以及待测物体不同材质带来的散斑、颜色纹理对光条的吸收、反射干扰光

收稿日期: 2011-01-18; **收到修改稿日期:** 2011-06-21

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK2009257)和江苏省 2010 年度普通高校研究生科研创新基金(CX10B_020Z)资助课题。

作者简介: 王 顺(1973—),男,博士,讲师,主要从事测试计量、图像处理、数据采集与光电信号检测等方面的研究。

E-mail: tigerking@vip.sina.com

* **通信联系人.** E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

条和离焦散射^[10]等恶劣情况。在这些情况下进行三维结构光测量(如测量物体尺寸),不仅需要得到测量结果,更需要知道测量结果的可信程度以便对测量结果进行取舍。三维结构光测量的结果误差与测量系统机械结构、摄像机镜头参数、图像传感器参数与像点对应空间位置精度、结构光条中心提取算法等有关^[11~13]。当测量系统固定后,其机械结构、摄像机、图像传感器也固定,故三维测量结果的信度取决于与结构光条中心提取算法的信度,并与之近似成线性关系。因此,三维结构光测量信度的评价可转换为对光条中心点提取的结果的信度评价,本文针对这一问题进行了分析研究。

2 光条模型

三维结构光测量模型如图 1 所示^[14],其过程为线结构光从激光器射出,遇到被测物体发生结构光条反射,在摄像机一端通过 CCD 或 CMOS 图像传感器接收到结构光条信号,经过 A/D 转换为数字图像,传输给计算机进行处理分析得到光条的中心点,继而通过三维视觉理论计算出结构光条的世界坐标、被测物体的尺寸等需要的信息。

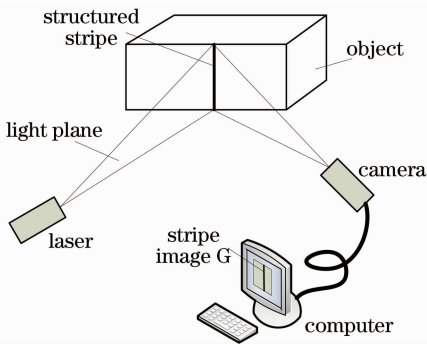


图 1 线结构光测量模式

Fig. 1 Line structured light vision measurement model

实际测量中,通过有无结构光条的前后帧相减得到光条图像。结构光条具有一定宽度,其法向截面表现为对称的条状特征。有些学者把光条横截面近似为方形^[8]或二次抛物线型^[9]。根据线激光产生的机理,光源激光束剖面均呈高斯分布^[1,15],因此,光条的切面也必然符合高斯分布。

本文模拟各种复杂情况,以中心波长 635 nm、功率 100 mW 的线激光投射到被测物体,观察结构光条截面的各种情况。实验结果如图 2 所示,根据被测物体的材质、颜色纹理以及环境影响等因素,将光条分为 4 种情况:背景环境中的潜在光条、不同颜色纹理吸收的光条、不同材质引起的光条散斑以及

由于反射产生的干扰光条。由图 2 可见,几种情况的光条截面,其两侧是一阶缓慢变化并趋于平坦,并不是简单的二次变化至零,更加符合高斯模型。且实际光条又具有一定的基底噪声,该噪声主要来自 CCD 的热噪声,故实际结构光条横截面可以更确切地用一个具有基底噪声的高斯模型 G 描述为

$$G(x, y) = A \exp \left[-\frac{(x - \mu_x)^2 + (y - \mu_y)^2}{2\sigma^2} \right] + n, \quad (1)$$

式中 $G(x, y)$ 为光条图像上点 (x, y) 的灰度值, x 为横坐标, y 为纵坐标,点 (x, y) 在光条法线 $y = kx + b$ 上, A 为高斯模型幅值, (μ_x, μ_y) 为高斯模型的中心点坐标, σ 为高斯模型的标准差——反映分布曲线的跨度, n 为高斯模型的基底。

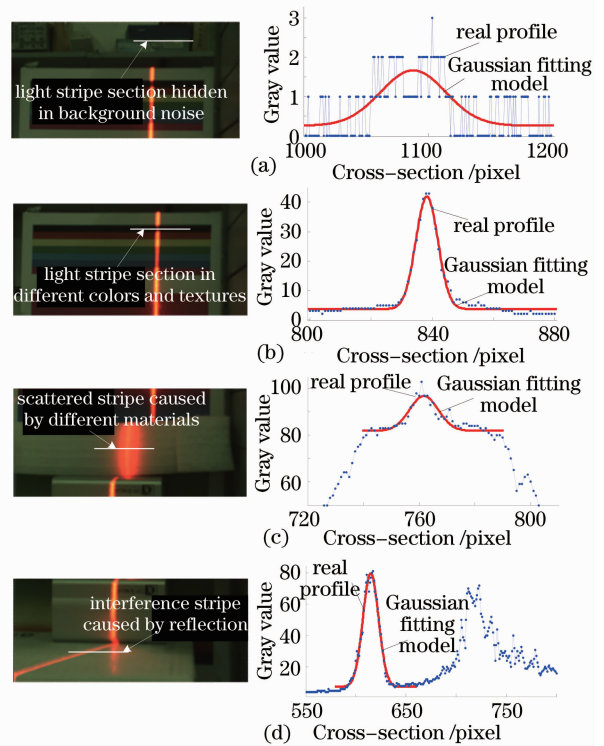


图 2 不同情况的光条截面。(a)背景噪声中的潜在光条;(b)不同颜色纹理的光条;(c)不同材质的光条散斑;(d)反射的干扰光条

Fig. 2 Stripe cross-section profiles in different situations. (a) Light stripe hidden in background noise; (b) light stripe in different colors and textures; (c) scattered stripe caused by different materials; (d) interference stripe caused by reflection

实际测量中,为提高测量精度,尽量保证结构光垂直扫描,使得到的光条在图像上垂直,光条法向横截面水平。则对于光条图像上任意一行 y 光条模型(1)式可以简化为

$$G(x) = A \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] + n, \quad (2)$$

式中 μ 为第 y 行上高斯模型的中心点坐标。

同时由图 2 可见,不管何种切面形状,都有唯一高斯模型与其对应。最终对光条中心点的提取,只需要除去基底的真实光条部分,如此以下分析都可以归一化至下式的高斯模型,进行统一比较:

$$G(x) = A \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3)$$

3 信度评价体系

由上述,光条图像由于环境、透视成像、物体材质等原因,最终导致一幅图像上的结构光条灰度、宽度不一致。对于三维结构光测量,常会遇到更为恶劣的情况,对提取得到的光条中心点的可信程度进行评价势在必行。另一方面对提取得到的光条中心点可信度评价,可以根据其值大小来判断信号的存在与否、区分信号与噪声;也可用作评价光条提取方法的优劣以及评价光条图像的优劣的依据。

3.1 信度评价依据

三维线结构光检测的整个过程(图 1),是结构光条能量的传递过程,且最终得到的光条图像的灰度与入射光的能量成正比。结构光条以光强 I_p (此处光强是指光的能量强度,即单位面积单位时间内通过的光的能量,即光度学中的照度)从激光器投射到被测物体发生反射。由 Phong 反射模型^[16]可知,反射到摄像机的结构光条光强 I 是环境光的反射光强 I_a 、漫反射光强 I_d 和镜面反射光 I_s 的总和:

$$I = I_a + I_d + I_s. \quad (4)$$

在被测物体一定的情况下,环境反射光强 I_a 由环境决定,在测量的短时间内可以认为 I_a 不变;而漫反射光强 I_d 和镜面反射光 I_s 均为与光源激光、摄像机视点相对反射物体位置关系相关的量,且在三者位置关系一定的情况下与入射光强成正比,即

$$I = I_a + k_1 I_p, \quad (5)$$

式中 k_1 为由系统决定的常数。

在摄像机接收端,以通用的 CCD 传感器为例,传感器接收到光强为 I 、光功率为 P ($P=IA_1$, A_1 为 CCD 感光面积)的光。随即 CCD 进行光电转换、电荷储存、电荷转移以及放大检测 4 个动作。光电转换中,在曝光时间 t 内,光电二极管以响应度 R 将光功率 P 转化为一定的电荷量 Q_0 ^[17] 为

$$Q_0 = RPt = RIA_1 t. \quad (6)$$

摄像机会自动调节曝光时间使 CCD 不至于饱和

而使图像过曝,故此处认为 CCD 均处于不饱和状态。

电荷的储存是一个极其短暂的过程,此过程电荷 Q_0 几乎不发生变化。电荷转移过程中,由于 CCD 本身的构造,电荷 Q_0 不可能完全转移,存在转移效率 ρ ,即电荷 Q_0 转移至后续放大检测变为电荷量 $Q = \rho Q_0$ 。

最后,电荷量 Q 经过增益为 g 的检测放大及 A/D 转换电路转化为供计算机分析处理的数字量 T , 则

$$T = gQ = g\rho Q_0 = g\rho RIA_1 t. \quad (7)$$

由前述可知,三维激光测量是通过有无激光前后两帧图像相减得到结构光条图像,设 T_L 为有激光时图像的 T_N 为无激光时图像,则结构光条图像为

$$T_h = T_L - T_N = g\rho R I_L A_1 t - g\rho R I_N A_1 t = A_1 t g \rho R (I_L - I_N), \quad (8)$$

式中 I_L, I_N 分别有、无激光时到达 CCD 的光强, $I_L = I_a + k_1 I_p, I_N$ 即为环境光 I_a , 则

$$T_h = A_1 t g \rho R (I_L - I_N) = A_1 t g \rho R [(I_a + k_1 I_p) - I_a] = A_1 t g \rho R k_1 I_p = KI_p. \quad (9)$$

式中 $K = A_1 t g \rho R k_1$ 。

可见,在 CCD 不饱和及不考虑 CCD 热噪声情况下,结构光条图像的灰度 T_h 与入射光强 I_p 成正比,究其本质,即 T_h 与 t 时间内结构光条入射的能量 E_p 成正比。这样得到的光条图像的灰度值越高,代表结构光条的能量也越高,图像上该处存在结构光条的可靠程度越大,可信度越大。

实际线结构光是具有一定宽度的、高斯型截面的光条,故以该点光条截面的能量和为该处真实光条能量,即以该点光条横截面积分的能量和来表征该处光条的能量。能量越大,该处结构光条存在性越大。在图像上,对应表现为,以点 (x, y) 为中心的光条高斯型横截面的灰度值和越大,则该处存在光条中心点的可信度越高。

如此,得到一点 (x, y) 为光条中心点的信度评价依据——光条横截面所具有的能量和。

3.2 不同光条模型比较

考虑光条横截面的形状,由于实际光条横截面形状不统一且存在噪声干扰,难以进行比较衡量,故都归一化至 2 节中提到的高斯模型(3)式进行统一评价计算。

对归一化后几种可能的的光条横截面情况比较分析(扣除基底噪声),如图 3 所示, b, c 曲线的 σ 相同,即 $\sigma_b = \sigma_c$; a, b, d 曲线的峰值 A 相同; d, a, b 曲线的

σ 依次增大, 即 $\sigma_d \ll \sigma_a < \sigma_b$; a, c 曲线的横坐标积分和相同。由图 3 可见:

1) 对于曲线 b, c , 在 σ 一致的情况下, 峰值 A 越高, 该处光条的能量越大, 则该点是中心点的可靠程度越好, 信度越高;

2) 对于曲线 a, b, d , 在峰值 A 相同情况下, 当 σ 极小时, 该光条是一个宽度为 1 pixel 的光条, 很可能是一个孤立的噪声点; 而 σ 越大, 光条越宽, 能够计算得到中心点的点数越多, 该处存在的中心点越可靠, 信度越高; 故 σ 越大, 光条截面的能量越大, 信度越高;

3) 对于曲线 a, c , 两者峰值 A (曲线 a 大于曲线 c) 和 σ ($\sigma_a < \sigma_c$) 都不一致, 但其积分和相同, 两者截面能量相同, 依据 1), 2) 很难分辨两者的信度高; 此种情况下, 根据评价依据两者得到的中心点的信度相同。

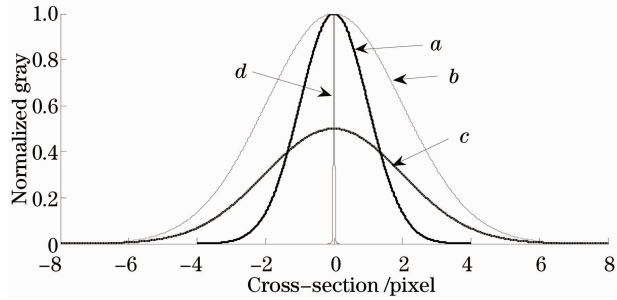


图 3 各种情况的高斯模型比较

Fig. 3 Different normalized Gaussian model comparisons

故以光条横截面所具有的能量和为光条中心点信度的评价依据是符合实际情况的。

3.3 光条中心点信度评价方法

根据 3.1 节的评价依据, 以待评价的光条图像和通过某种方法得到的光条中心点为评价体系输入, 以该图像上该方法得到的光条中心点信度评价为输出, 整个评价方法主要分四步:

1) 自适应估计光条横截面宽度并除去局部基底噪声。

对于光条图像 f (图像 f 的高度和宽度为 M, N), 对一行 y_c , 通过某种方法确定该行的光条中心点的横坐标 x_c 。由图 2 可知光条各部分的基底噪声是不同的, 但在局部是稳定的; 且对行 y_c , 光条线宽 w_c 一定。

由于噪声一般为白噪声, 故在该光条周围 w_c 宽度的范围内对灰度值作平均以估算噪声基底 \bar{n} :

$$\bar{n} = \frac{\sum_{x_i=x_c-2w_c}^{x_i=x_c-w_c} f(x_i, y_c) + \sum_{x_i=x_c+w_c}^{x_i=x_c+2w_c} f(x_i, y_c)}{2w_c}, \quad (10)$$

则该点局部除去噪声的图像为

$$f_0(x_i, y_c) = f(x_i, y_c) - \bar{n}, \quad (11)$$

式中 $x_c - 2w_c \leq x_i \leq x_c + 2w_c, 1 \leq y_c \leq M, x_c, y_c \in Z$ 。

2) 归一化到高斯模型。

对除去噪声的图像 f_0 , 中心点 (x_c, y_c) 的灰度为 $p_c = f_0(x_c, y_c)$, 可以找到唯一与 y_c 行对应的高斯模型(3)式。本文信度评价对象为光条中心点, 故在评价时应该以该中心点为高斯模型的中心点。则以 x_c 为高斯模型中心点位置 μ , 该点灰度值 p_c 为峰值 A , 最终(3)式中只有一个未知量 σ 。由于光条横截面为一维离散序列, 本文利用最小二乘法来最佳拟合 σ 。

根据高斯模型的特性, 99.99% 的高斯能量集中在 $[\mu - 4\sigma, \mu + 4\sigma]$ 的范围内, 而对已除去噪声的 y_c 行, 所有光条能量都集中在 $[x_c - w_c/2, x_c + w_c/2]$, w_c 为该行光条宽度。故为提高计算效率, 缩小代入计算的范围, 在 $[x_c - w_c/2, x_c + w_c/2]$ 内进行最小二乘拟合, (3)式化为

$$f_0(x_i, y_c) = p_c \exp\left[-\frac{(x_i - x_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (12)$$

式中 $x_i \in [x_c - w_c/2, x_c + w_c/2]$, 对(12)式两边取对数得

$$\ln f_0(x_i, y_c) = \ln p_c + \left[-\frac{(x_i - x_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (13)$$

$$y = kx^2, \quad (14)$$

式中 $k = 1/\sigma^2, x = x_i - x_c, y = 2[\ln p_c - \ln f_0(x_i, y_c)]$ 。

利用最小二乘法对(14)式进行线性拟合, 对不同的 σ , 得到拟合后的曲线分布与实际的均方差 N_{RMSE} , 最小 N_{RMSE}^{\min} 的对应 k_c , 即为高斯归一化模型中唯一的 $\sigma_c = \sqrt{1/k_c}$ 。

如图 4 所示, 随着 σ 的增大, N_{RMSE} 先减小后增大并存在一个极小值 N_{RMSE}^{\min} , 即唯一的最佳拟合值 σ_c 。

该行 y_c 归一化高斯模型为

$$g(x_i) = \begin{cases} p_c \exp\left[-\frac{(x_i - x_c)^2}{2\sigma_c^2}\right], & x_i \in [x_c - 4\sigma_c, x_c + 4\sigma_c] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

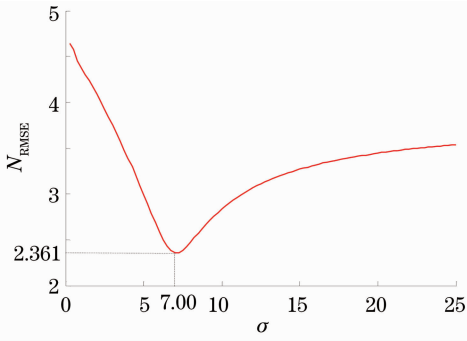


图 4 光条图像的一个切面的均方差与 σ 关系
Fig. 4 Relation between MSE of a cross section of light stripe image and σ

3) 计算最佳高斯拟合模型的能量和。

由前述的评价依据——光条截面的能量和，即为图像上光条截面的灰度值和。此处，由最佳匹配模型，对这一部分的高斯形状进行积分求和，求光条横截面的能量 E ，对于 y_c 行可表示为

$$E_{y_c} = \sum g(x_i), \quad (16)$$

即为该点的信度指标。

4) 对信度指标进行全局图像进行归一化。

三维结构光测量，是由多帧光条图像为原始数据的，故需要对不同帧光条图像的中心点信度进行统一。对得到的一幅图像中心点的点信度评价，本文按该图像的最大值进行归一化处理，信度

$$R_{y_c} = E_{y_c} / E_{\max}, \quad (17)$$

式中 $E_{\max} = \max(E_{y_i}), 1 \leq y_i \leq M$ 。

4 实验结果

利用上述的评价方法对光条图像上提取得到的中心点进行信度评价，如图 5 所示，以图 2 的光条图像为例[图 5(a), (b)]，以图 5(a)上得到的光条中心点图 5(b)输入信度评价体系，得到评价结果如图 6(a)所示，并将此结果与中心点原有灰度值图 6(b)和 Hessian 矩阵的二阶梯度值图 6(c)作比较。图 5 中①~④和图 6 中 $a' \sim d'$ 分别对应图 2 中(a)~(d) 4 种情况，其中图 6 中 e' (对应图 5 中的⑤)为形态较好的高斯曲线，是信度最为可靠的，以此作为其他情况的参照，比较结果定性分析如表 1 所示。

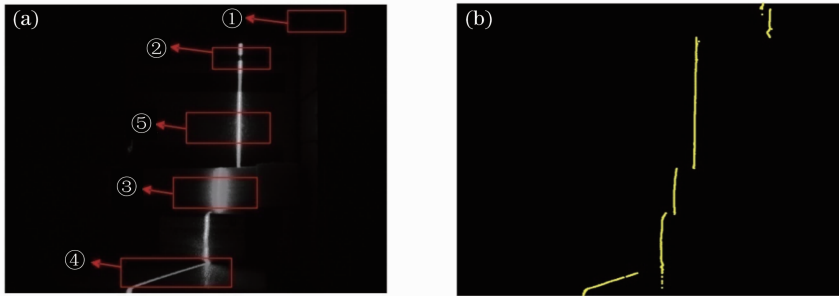


图 5 待评价对象。(a)待评价图像；(b) (a)中光条图像待评价的中心点

Fig. 5 Objects to be evaluated. (a) Image to be evaluated; (b) centers in of light stripe image under evaluation (a)

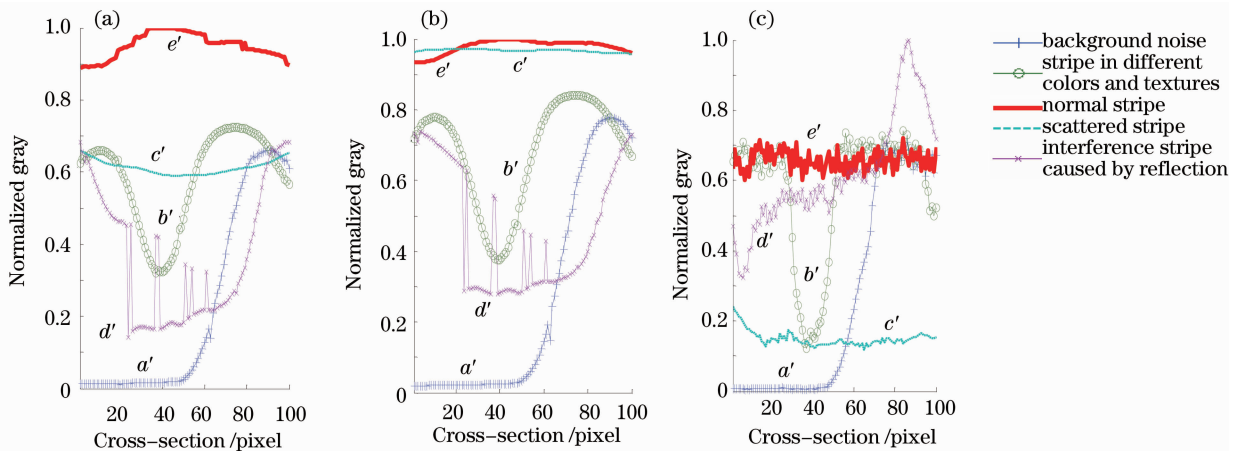


图 6 图 5 的评价结果。(a)本文评价方法结果；(b)原灰度值；(c) Hessian 矩阵二阶梯度值

Fig. 6 Evaluation results of Fig. 5. (a) Reliability evaluated by this paper's method; (b) original grey value for comparison; (c) second order gradient value of Hessian matrix for comparison

表 1 各种情况定性分析结果

Table 1 Qualitative analysis for different situations

Fig. 2	①	②	③	④	⑤
Proposed reliability evaluation method result	○	○	○	○	○
Original grey value	△	○	×	△	○
Second order value	○	○	×	×	×

* ○: The reliability evaluation result is good; △: fine; ×: poor

对于图 2(a)情况,激光投射到较远的背景物体,在光条图像上,此光条淹没于背景噪声,3种结果在此处值都很低(图 6 中 a' 曲线),而本信度评价方法和 Hessian 矩阵二阶梯度值又更低于灰度值,更加区别于非噪声的光条。

而图 2(b)情况,由于颜色纹理产生不同程度的吸收时,光条的灰度值较低,信度较低,如图 6 中 b' 曲线,三种结果均真实表现了这一情况。

对于图 2(c)情况,由于材质产生的大的散斑,使得局部区域,光条灰度值近饱和,同时周围噪声也增大,故此处信度是不佳的,但由于此处能量较高,数据较为可靠,具有一定的可信度。由图 6 中 c' 曲线可见,本文评价方法较真实表现了这一情况。而仅用灰度值无法区分此处与光条形态较好的光条中心点图 6 中 e' 曲线, Hessian 矩阵二阶梯度值在此处偏低,且较为混乱。

对于图 2(d)情况,由于反射界面的存在,产生干扰光条,信度应偏低。由图 6 中 d' 曲线可知,本文评价方法得到的信度评价最低,而事实上,这一段干扰是不可信的,这样仅需要一个阈值分割,即可区分信度高的中心点和噪声干扰的点。

对于图 5 中⑤情况,本文方法和灰度值均真实的表现了该处信度高的特点,而 Hessian 矩阵二阶梯度值表现则比较混乱。

可见,本文针对结构光条提出的信度评价方法更能够准确评价各中心点情况,并符合实际需求。

本文的信度评价结果误差主要受噪声影响,噪声主要来自 CCD 的热噪声。本文固定一字线激光器及摄像机位姿,通过改变摄像机增益来得到不同噪声方差的光条图像。在每个级别的噪声方差,对空间中一点重复采集 100 次,统计地观察 CCD 热噪声引起的不同信噪比对本文信度评价结果的影响。本文以峰值信噪比作为图像的信噪比,以观察信度评价结果的相对误差与图像噪声之间的关系,如图 7 所示。

可见,当 CCD 热噪声的增大,图像信噪比减小

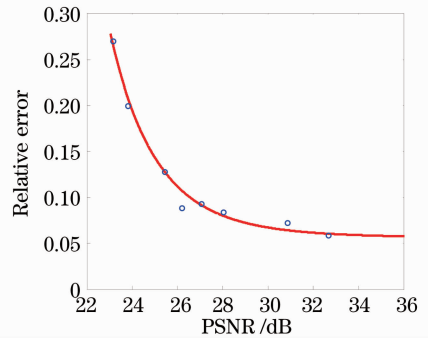


图 7 本文信度评价的相对误差与光条图像信噪比的关系

Fig. 7 Relative error of the proposed reliability evaluation versus PSNR of the light-stripe image

时,信度评价的相对误差随之迅速增大;而当 CCD 噪声减小,图像信噪比增大时,信度评价的相对误差缓慢减小,并趋于一个接近 0 但不为 0 的常数。这是因为即使完全不受 CCD 热噪声影响,整个系统还存在其他噪声,如激光本身的波动带来的噪声、待测物体表面材料等等,都会使得结构光光条本身带有噪声,故最终使得当 CCD 热噪声为 0,信度评价的相对误差仍然存在。当图像信噪比很高时,信度评价结果的相对误差在 5% 附近。

5 结 论

由实验观察,根据被测物体的材质、颜色纹理、环境影响等因素,将光条分为四种情况:背景环境中的潜在光条、不同颜色纹理吸收的光条、不同材质引起的光条散斑以及由于反射产生的干扰光条。针对结构光条中心点信度评价的需求,将各种情况的光条横截面归一化为高斯模型进行统一比较,在除去基底噪声的基础上,以光条法向横截面实际能量为评价依据,提出了光条中心点信度评价的方案。

同时,实验验证了信度评价结果能够准确评价各情况提取得到的中心点,符合实际需求。对于三维结构光测量,即使是更为恶劣的情况(如强环境光等)下,也可利用此评价体系来评价光条中心点的可信程度。此评价体系也可为后续的三维模型恢复和测量提供可信度的原始信度评价数据,以保证整个三维测量的可信度;此外,也可以为评价光条图像的优劣以及评价光条提取方法的优劣提供依据。

参 考 文 献

- 1 Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Measurement Technology [M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2001. 129~139
孙长库,叶声华. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2001. 129~139
- 2 Wu Jianbo, Cui Zhen, Zhao Hong *et al.*. An adaptive threshold

- method for light-knife center acquisition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(1): 62~64
- 吴剑波, 崔 振, 赵 宏 等. 光刀中心自适应阈值提取法[J]. *半导体光电*, 2001, **22**(1): 62~64
- 3 Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(4): 151~155
- 吴庆阳, 苏显渝, 李景镇 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(4): 151~155
- 4 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng. An algorithm for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method [J]. *J. Image and Graphics*, 2008, **13**(1): 64~68
- 李中伟, 王从军, 史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, **13**(1): 64~68
- 5 Hu Bin, Li Dehua, Jin Gang *et al.*. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, **38**(11): 59~60
- 胡 斌, 李德华, 金 刚 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, **38**(11): 59~60
- 6 He Zhonghai, Wang Baoguang, Liao Yibai *et al.*. Subpixel algorithm using a curve fitting method [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(2): 195~197
- 贺忠海, 王宝光, 廖怡白 等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(2): 195~197
- 7 Sui Liansheng, Li Bing, Jiang Zhuangde. Research on method of laser-knife center position extracting based on NURBS interpolation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 933~937
- 隋连升, 李 兵, 蒋庄德. 基于 NURBS 曲线插值的激光光刀图像中心提取方法的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 933~937
- 8 C. Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(2): 113~125
- 9 Zhou Fuqiang, Chen Qiang, Zhang Guangjun. Composite image processing for center extraction of structured light stripe [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1534~1537
- 周富强, 陈 强, 张广军. 结构光光条提取的混合图像处理方法 [J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(11): 1534~1537
- 10 Zhang Yixin, Wang Shun, Zhang Xuping. Defocused blur image restoration in large scale 3D vision measurement [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2010, **31**(12): 1~6
- 张益昕, 王 顺, 张旭莘. 大尺度三维视觉测量中的离焦模糊图像恢复[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(12): 1~6
- 11 J. W. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 12 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 13 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~948
- 郝继贵, 李艳军, 叶声华 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 943~948
- 14 Wang Baoguang, He Zhonghai, Chen Lincai *et al.*. Model and performance analysis of structured light sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 481~484
- 王宝光, 贺忠海, 陈林才 等. 结构光传感器模型及特性分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 481~484
- 15 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Research on light-knife propagated by reflection of Gaussian light beams at cylinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(2): 133~136
- 张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 高斯光束柱面反射展成法生成光刀的研究[J]. *中国激光*, 2001, **28**(2): 133~136
- 16 Sun Jianguang. *Computer Graphics (Third Edition)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 506~508
- 孙家广. *计算机图形学(第三版)* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 506~508
- 17 Kazuya Yonemoto. *CCD/CMOS Image Sensor Foundation and Application* [M]. Chen Rongting *et al.* Transl.. Beijing: Science Press, 2006. 23~69
- 米本和也. *CCD/CMOS 图像传感器基础及应用* [M]. 陈榕庭等译. 北京: 科学出版社, 2006. 23~69