

线性结构光心的自适应迭代提取法

崔希君, 杨川, 刘保华, 李兵

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对线结构光测量系统中如何提高光刀中心位置提取精度的问题, 根据系统量传递理论, 建立了线结构光截面强度的偏态分布分析模型, 采用一种基于重心法的自适应迭代算法来提取光刀中心位置, 并且分析了被曲面调制后的光刀强度分布变化对光刀中心位置提取精度的影响. 分别对45°标准斜面 and 自由曲面进行了实验, 并与阈值重心法、自适应阈值法进行了比较. 实验结果表明, 自适应迭代提取算法可以得到较稳定、更准确的光刀中心位置数据, 精度可从50 μm 提高到10 μm 左右, 并具有受外界干扰影响较小的特点, 因此满足了线结构光测量系统的测量精度要求.

关键词: 线结构光; 偏态分布; 自适应迭代

中图分类号: TP391; TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0073-04

Self-Adaptive Iterative Method of Extracting Center of Linear-Structured Light Stripe

Cui Xijun, Yang Chuan, Liu Baohua, Li Bing

(State Key Laboratory for Manufacturing Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at improving the precision of extracting the center position of the light stripe of the linear light measurement system, an abnormal distributing model of energy of light stripe section is established, where a self-adaptive iterative algorithmic is developed to extract the center position of the light stripe based on the centrobaric method. The modulated influence on the distribution of energy of light stripe resulting from the measured object surface is investigated. The tests with standard bevel of 45° and the free surface are conducted respectively. Compared with the center position gotten by centrobaric method and self-adaptive threshold method, it is found that the proposed method enables to extract the light stripe center position exactly and steadily to outperform with a precision of 10 μm and higher anti-interference capacity.

Keywords: linear-structured light stripe; abnormal distribution; self-adaptive iterative

线结构光在视觉检测和非接触扫描测量中已被广泛应用, 它通常与电荷耦合 (CCD) 摄像机按照三角法原理^[1] 组成结构光测量系统. 根据不同的应用场合和检测对象可产生多种结构光的形式, 其中线结构光的测量系统具有结构简单、处理方便、测量效率高、易于实现和三坐标测量系统的结合等特点, 从而成为最常用的结构光形式.

光刀是高斯点光源经圆柱调制之后形成的近似直线的光学样条, 它在被测物体表面上具有一定宽

度, 并且宽度不均匀, 在景深处较窄, 景深之前或之后较宽. 光刀的亮度在不同的位置也不同, 特别是在被测表面曲率变化较大时, 光刀强度被调制并且不再符合正态分布^[2]. 在线结构光测量系统中, 物体表面的形貌是由光刀中心在 CCD 上的位置决定的, 因此准确提取光刀中心是提高测量精度的重要环节. 目前, 常用的光刀中心提取方法主要分为阈值法、图像识别 (GA 算法)、拟合曲线求极值法, 以及重心提取法^[2-4], 并且在这几种方法的基础上进行各种改

进,以提高光刀中心的提取精度.本文对光刀强度偏态分布的成因及光刀中心提取问题进行了研究,并提出了一种自适应迭代的重心位置提取算法.

1 仪器设备调制模型及误差分析

如图1所示,测量系统采用三角法的测量原理,光源为8条垂直入射的线性结构光刀,双CCD(电荷耦合器件)对图像数据进行采集.

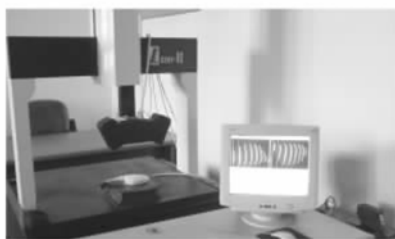


图1 多线结构光测量系统

在理想的情况下,光刀在宽度方向上的强度是服从正态分布的^[5],即

$$G(x) = A \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: A 表示光刀强度的幅值; σ 表示光刀的跨度; μ 表示理想的光刀中心位置.

在由光刀光源、被测曲面以及CCD组成的系统中,输入信号的强度函数为 $G(x)$,被测曲面被视为调制系统,其函数表达为 $H(x)$,CCD成像平面上得到的强度分布即为输出信号 $I(x)$,系统引起的噪声信号为 $N(x)$.根据卷积定理得到

$$I(x) = G(x) * H(x) + N(x) \quad (2)$$

式中: $N(x)$ 噪声是由CCD发热、漏电流和不同被测表面反射率,以及外部环境变化等原因引起的,这些随机噪声可以在图像处理过程中选用适当的滤波方法去除^[6-7].CCD的非线性畸变可以在系统标定时进行校正,光瞳散斑引起的误差在光瞳足够大时也可以忽略^[8],本系统的圆孔光瞳半径为1 mm,光瞳散斑误差可忽略.图2显示了被测曲面对光刀正态分布光强造成的调制影响,其中理想光刀光强呈正态分布: $\mu=0, \sigma=3.0$.从图2中可以看出,理想光刀的能量在线宽方向上经过被测曲面反射调制之后,光强呈现近似的偏态分布,此时利用重心法对CCD采集得到的光刀图像进行中心提取,得到的光刀中心位于 o'_1 处,偏离了真实的光刀中心 o' .在反求测量过程中,由此引起的误差则放大转化为被测物体高度上的误差,如图3所示.根据相似三角形的相似

原理,由此引起的反求误差近似为

$$\Delta h = h_{o'-o'_1} s/s' \quad (3)$$

式中: s, s' 分别为镜头的物距和相距; $h_{o'-o'_1}$ 为光刀中心的提取误差.

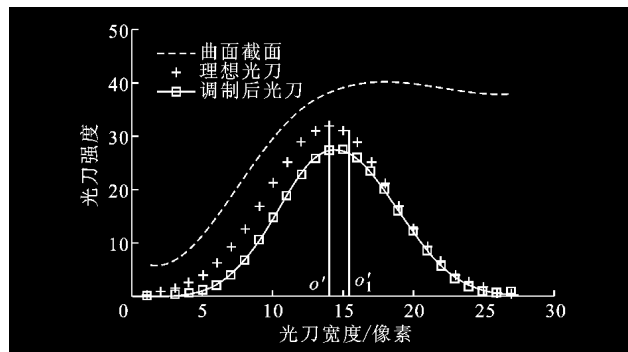
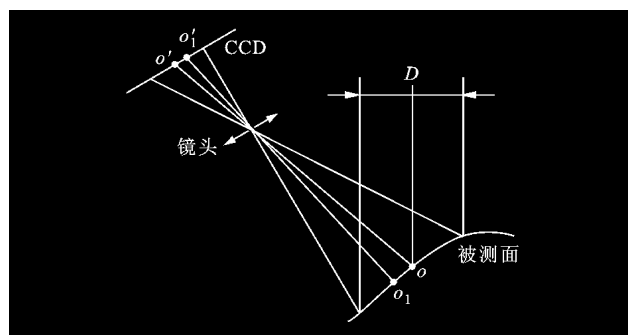


图2 光刀强度曲面调制后的分布曲线



D :光刀宽度; o :理想光刀中心; o' : o 在CCD上的映射点;
 o_1, o'_1 对应的空间表面点; o'_1 :提取光刀的中心位置

图3 中心提取误差和反求误差的关系

2 自适应重心迭代算法

2.1 偏态分布重心特性

重心法是现行的提取光刀中心的常用方法,其目的是将能量重心作为光刀中心.该方法具有提取相对准确,计算效率较高的特点,它的表达式为

$$o = \sum_{n=1}^N I_n n / \sum_{n=1}^N I_n \quad (4)$$

式中: I_n 为像素 n 上的光强度.由于在光刀能量呈偏态分布时,用简单的重心法提取到的光刀中心位置会因为能量的分布不均而发生偏移,产生提取中心误差,因此根据曲线特征,强度幂次减小时的值向1靠拢,并由此对重心法进行改进

$$o_m = \sum_{n=1}^N I_n^m n / \sum_{n=1}^N I_n^m \quad (5)$$

式中: m 为幂次,当 $0 < m < 1$ 时,随着 m 的变小,偏态分布越接近于正态分布,提取重心就越接近正态分布的重心.如图4所示, $m=0.125$ 时,光刀中心位置比图2中所示的重心位置明显更加接近于理想的

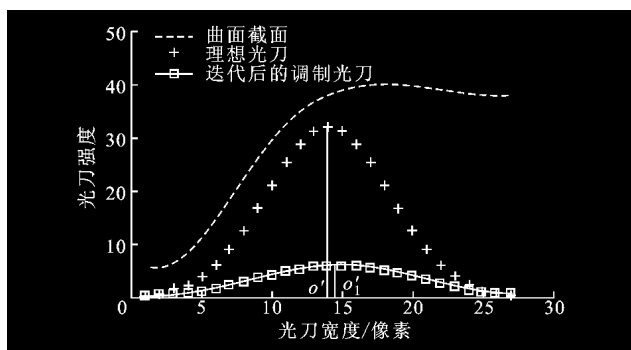
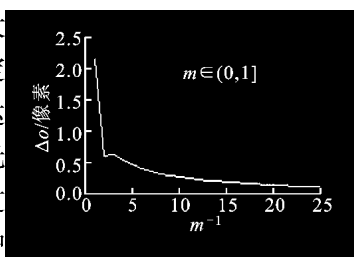


图4 迭代运算后调制光刀的强度分布

正态中心. 当 $m > 1$ 时, 偏态分布进一步锐化, 峰值系数变大, 偏态系数也变大, 因此提取重心偏差随着偏态系数的增大而增大. 式(6)表示 m 在 $(0, 1]$ 区间不断减小的情况下, 光刀相邻 2 次提取的重心距离

$$\Delta o = |o_{m1} - o_{m2}| \quad (6)$$

图 5 所示为 Δo 随幂次倒数 $1/m$ 的增大而逐渐减小直到稳定状态的情况, 当 Δo 达到允许极限值 ξ 时, 光刀重心提取完毕. 通过多次实验, 表明用这种方法提取的光刀重心可以很快达到稳定值.

图5 Δo 与 m^{-1} 的关系

2.2 自适应重心迭代算法

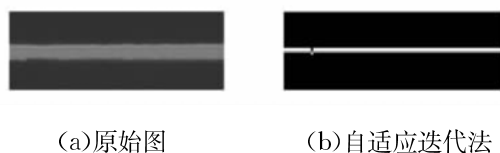
自适应迭代提取光刀中心, 可分成如下几个步骤: ①将光刀图像进行均值滤波, 去除背景噪声以及光刀上的粗大噪声; ②初始化幂次 $m_0 = 1$, 对光刀图像上的每列像素点 (u, v_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) 进行重心提取; ③幂次 $m = 1/2$, 对光刀图像上的每一列点进行重心提取; ④计算相邻 2 次重心提取的差值 Δo_j , 如果 Δo_j 大于 ξ , 则使 $m_{i+1} = m_i/2$, 返回②重新计算, 否则, 结束程序.

3 实验与分析

如图 6 所示, 利用倾角 45° 的标准楔形块进行实

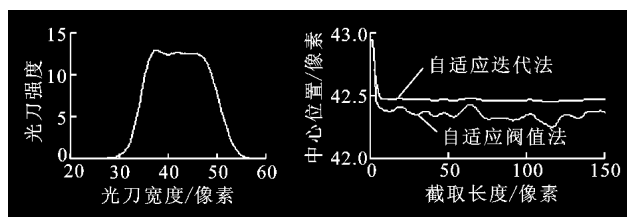
验, 测头准确运动, 光刀与楔形面平行. 从水平面开始进行测量, 自检测到开始测量楔形块, 水平移动的距离理论上等于垂直方向上的测量高度. 图 6a 为三维测量系统在测量标准样块表面时采集到的图像, 此时 CCD 摄像机在高度方向的平均分辨率为 0.33 mm/像素 , 而测量理论高度为 14.02 mm . 图 6c 是正态分布光强经斜面调制后的强度曲线, 表明强度分布已经由原来的正态分布调制形成偏态分布, 与理论计算值相吻合. 图 6d 分别是采用 2 种方法提取的光刀中心位置, 可以看出, 采用自适应迭代法提取的光刀中心位置的波动较小. 自适应迭代法和自适应阈值法提取光刀中心位置的平均值分别为 42.533 像素和 42.363 像素, 计算得到的中心位置高度分别为 14.036 mm 和 13.973 mm . 用同样的方法对不同的测量高度进行多次测试, 数据如表 1 所示. 从表 1 中可以发现, 当采用自适应阈值法提取光刀中心位置时仅考虑了光刀强度峰值的分布, 而忽略了光刀在整个宽度方向上由偏态分布所造成的影响, 因此提取的光刀中心位置存在着较大的误差.

图 7a 所示是三维测量系统在测量自由曲面时所采集到的一幅光刀图像, 提取光刀的中心位置为: ①在噪声干扰的情况下, 采用普通阈值重心提取法提取的光刀中心位置会出现严重的失真(见图 7b); ②自适应阈值重心提取法会由于光刀强度峰值分布



(a)原始图

(b)自适应迭代法



(c)光刀强度分布 (d)2 种方法提取中心位置的对比

图6 45° 标准楔形表面提取的光刀中心位置

表1 自适应迭代法和自适应阈值法的精度比较

mm

水平运动距离	高度均值		高度标准差		高度平均误差	
	自适应阈值	自适应迭代	自适应阈值	自适应迭代	自适应阈值	自适应迭代
14.020	13.973	14.036	0.178	0.186	0.047	0.016
20.860	20.805	20.873	0.202	0.274	0.055	0.013
26.250	26.200	26.237	0.228	0.283	0.050	0.013



(a)原始图



(b)普通重心法



(c)自适应阈值法



(d)自适应迭代法

图7 不同方法提取光刀中心位置的对比

不均匀引起中心位置的抖动(见图7c),使提取中心位置的最左边部分与原图有部分的失真;③自适应迭代重心提取法由于每一行的重心都会最终趋于稳定,所以会得到比较平滑的重心,并且提取的中心与原图相吻合(见图7d)。

4 结 论

本文对线性结构光经调制导致的强度非正态分布模型进行了分析,提出的自适应迭代重心提取法提高了光刀中心位置的提取精度。实验表明,可将提取光刀中心位置的精度控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右,与其他方法比较,所提取的光刀中心位置更加光滑、稳定,并且基本消除了因光刀被自由曲面调制引起的光刀中心位置提取误差,因此满足了快速精密测量的要求。

参考文献:

- [1] 李兵,罗意平,王昭,等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究[J]. 光子学报, 2003, 19(4): 738-741.
Li Bing, Luo Yiping, Wang Zhao, et al. Study on the rapid measuring method of multi-light-knife for 3D profile[J]. Acta photonica Sinica, 2003, 19(4): 738-741.
- [2] 解则晓,张成国,张国雄. 基于B样条迭代法的激光光

条噪声去除技术研究[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 430-433.

Xie Zexiao, Zhang Chengguo, Zhang Guoxiong. Research on removing the noise on the laser stripe based on the iterative fitting of B_spline[J]. Optical Technique, 2005, 33(3): 430-433.

- [3] 李和平,李德华,朱洲,等. 基于遗传算法的结构光条纹中心检测方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 82-86.

Li Heping, Li Dehua, Zhu Zhou, et al. Detection of structured light strip center line based on genetic algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 82-86.

- [4] 随连生,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.

Sui Liansheng, Li Bing, Jiang Zhuangde. Research on method of laser-knife center position extracting based on NURBS Interpolation[J]. Chinese Journal of Laser, 2003, 30(10): 933-937.

- [5] 解则晓,张成国,张国雄. 线结构光侧头的误差补偿[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(7): 667-670.

Xie Zexiao, Zhang Chengguo, Zhang Guoxiong. Error compensation for structured light sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(7): 667-670.

- [6] 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.

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.

- [7] 贺俊吉,张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 593-597.

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.

- [8] 李继陶,苏显渝,李杰林,等. 激光散斑引起的象强度中心漂移的理论计算[J]. 光电工程, 1996, 23(4): 32-39.

Li Jitao, Su Xianyu, Li Jieli, et al. Theoretical calculation for centroid shift of image due to laser speckle[J]. Opto-Electronic Engineering, 1996, 23(4): 32-39.

(编辑 管咏梅)