

基于激光三角法和嵌入式的微位移实时检测系统

王云飞, 李鹏飞

合肥工业大学

摘要: 基于激光三角法和嵌入式的微位移实时检测技术,采用激光三角法测距和灰度重心法提取激光条纹中心的原理,使线结构光、透镜、CCD 位置信息满足 Scheimpflug 共轭清晰成像条件。通过图像处理获取像面坐标系统位移信息,得到待测物体物面坐标系的位移,利用灰度重心法实时提取结构光条纹中心的特点,结合嵌入式系统尺寸小、稳定、便携的特性,实现对待测物体进行实时、非接触和微位移测量。

关键词: 激光三角法;Scheimpflug 原理;灰度重心法;嵌入式

中图分类号: TG81;TH741

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.01.023

Real-time Micro-displacement Detection System Based on Laser Triangulation and Embedded System

Wang Yunfei, Li Pengfei

Abstract: Based on the laser triangulation method and embedded micro-displacement real-time detection technology, the principle of laser triangulation ranging and gray center of gravity method to extract laser fringe center are introduced. The position information of line structured light, lens and CCD can satisfy the condition of Scheimpflug conjugate clear imaging. The displacement information of image plane coordinate system is obtained by image processing, and then the displacement of object surface coordinate system is obtained. The real-time feature of structured light fringe center is extracted by gray centroid method, with the small size, stability and portability of the embedded system, the whole measurement system can realize real-time, non-contact and micro-displacement measurement of the measured object.

Keywords: laser triangulation; Scheimpflug principle; gray centroid method; embedded system

1 引言

激光三角法作为非接触式测量中的重要技术,具有高精度、长距离和响应快的优点。将线结构光照射在待测物体表面,在满足 Scheimpflug 原理的条件下,面阵 CCD 相机能获取清晰的光条图像。选取基准面,在相对于基准面的正负方向移动待测物体,利用得到的数据对系统进行标定,结合光条纹中心提取算法实时精确地计算光条纹在相面坐标系产生的位移,通过换算关系将待测物体在物面坐标系产生的微位移实时显示。试验表明,该系统具有较高的响应速度和测量精度。

2 测量原理

2.1 激光三角法

微位移实时测量系统的光学结构如图 1 所示,激光光线、透镜的主平面、光敏面相交于点 O ,满足 Scheimpflug 原理的恒聚焦光路。在该结构下,待测物体在激光束方向上的任意一点都能在相机上清晰

成像,在物体做直线运动时,像面上的光条纹也做直线运动。成像公式为

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{l_0} + \frac{1}{l'_0} \quad (1)$$

式中, l 和 l' 分别为点 H 的物距和相距; l_0 和 l'_0 分别为点 H_1 的物距和相距。

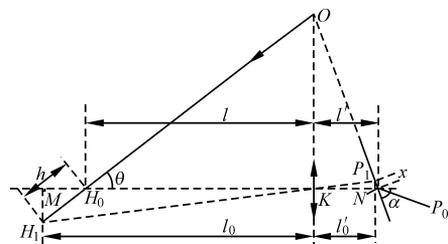


图 1 激光三角法成像原理

由 ΔKH_1M 与 ΔKNP_1 相似可得 Scheimpflug 原理的数学表达式为

$$l' \tan \alpha = l \tan \theta \quad (2)$$

式中, α 为像面与透镜光轴的夹角; θ 为光线与透镜光轴的夹角。

由图 1 可知,线激光器发出的光照射在基准点 H_0 ,对应的像点为 P_0 。当物体相对基准点移动 h 到达 H_1 时,像点移动 x 到达点 P_1 ,根据几何关系,物体移动的距离 h 与像面上对应的位移 x 之间的关系为

$$h = \frac{l x \sin \alpha}{l' \sin \theta + x \sin(\theta + \alpha)} \quad (3)$$

由式(3)可计算系统的分辨率 $\frac{dh}{dx}$ 为

$$\frac{dh}{dx} = \frac{l' \sin \theta \sin \alpha}{[l' \sin \theta + x \sin(\theta + \alpha)]^2} \quad (4)$$

式中, $\frac{dh}{dx}$ 为光敏面上的像点移动单个像元尺寸时,对应物体移动的最小物面位移。其值越小,精度越高。

2.2 数据和图像处理

(1) 数据处理

由式(3)可知,至少需要4组 h 和 x 的值求解方程组得到4个未知数 l, l', α, θ 的值。但这将会引入4个误差分量,对测量结果产生较大的系统误差。因此,采用将非线性关系线性化,并用最小二乘拟合进行数据处理,从而简化系统进行标定的方法。

由式(3)可得

$$h = \frac{x}{\frac{l' \sin \theta}{l \sin \alpha} + x \frac{\sin(\theta + \alpha)}{l \sin \alpha}} \quad (5)$$

令 $M = \frac{l' \sin \theta}{l \sin \alpha}, N = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{l \sin \alpha}$,则可简化为

$$\frac{1}{h} = \frac{M}{x} + N \quad (6)$$

由式(6)可知,物面位移和像面位移的倒数 $\frac{1}{h}$ 和 $\frac{1}{x}$ 成线性关系,通过测量若干组 h 和 x 的数据,利用最小二乘拟合完成对系统的标定,选用插值法获得待测物体任意位置的位移信息。

(2) 光条纹中心提取

通过任意时刻光条纹在图像上的列坐标与基准光条纹列坐标之差乘以像元尺寸得到像点在光敏面上的物理位移 x 。为得到精确的光条纹列坐标信息,需对光条纹进行中心提取预处理。

目前主要的光条纹中心提取算法主要有 Steger 算法^[1]、灰度重心法、方向模板法和脊线追踪法等。Steger 算法精度高,但速度慢,难以满足实时要求;其他几种方法虽精度不如 Steger 算法,但处理速度快,能满足实时要求。表1为不同算法对相同尺寸图片的处理速度。本文选择处理速度快、精度适中的灰度重心法进行光条纹中心提取。

表1 处理时间对比

中心提取算法	图像大小(pixel)	时间(s)
Steger	700 × 450	2.985
方向模板法	700 × 450	0.107
灰度重心法	700 × 450	0.0208

3 试验过程与结果

试验系统装置见图2。线激光发生器和待测物体放置在滑动导轨上,发生器和待测物体可通过其配备的螺旋测微仪做前后左右移动。透镜和面阵 CCD 成一定夹角放置在可绕圆心转动的滑动导轨上。激光线、透镜主平面和 CCD 平面相交于一点。相机将采集到的图像信息传输到图3的英伟达 TX2 模块。TX2 是一台采用 NVIDIA Pascal 架构的模块化 AI 超级计算机,性能完善,外形尺寸为 50mm × 87mm。

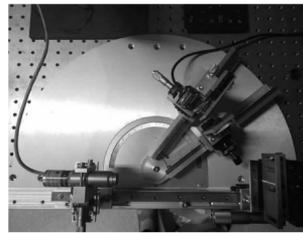


图2 试验装置

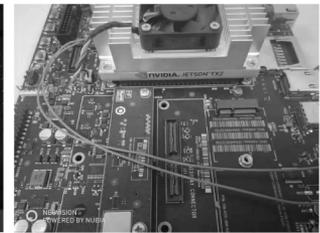
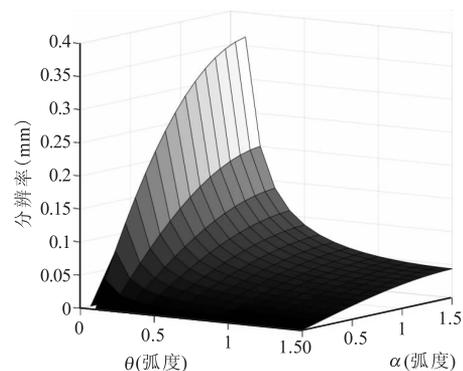
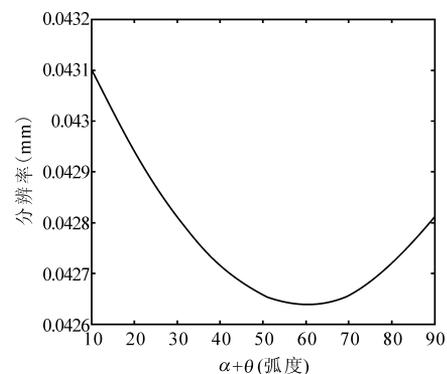


图3 嵌入式模块

由式(4)得到 θ, α 对系统分辨率的影响见图4。由图4a可得,当 $\theta = 90^\circ, \alpha \approx 0^\circ$ 时,分辨率最优,但与实际不符。由图4b~图4d可知,系统分辨率随 θ 的增加而提高,随 α 的增加而降低,并当 $\theta + \alpha \approx 60^\circ$ 时达到最优。试验过程要在满足 Scheimpflug 原理和 $\theta + \alpha \approx 60^\circ$ 条件下,增大 θ 并减小 α 。



(a) α, θ 与分辨率的关系



(b) $\alpha + \theta$ 与分辨率的关系

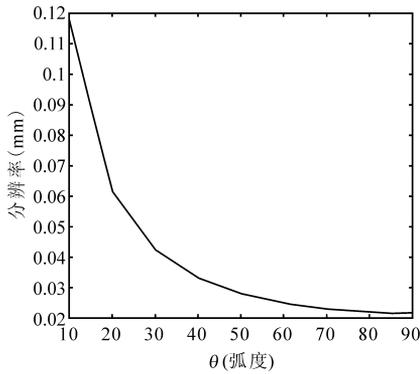
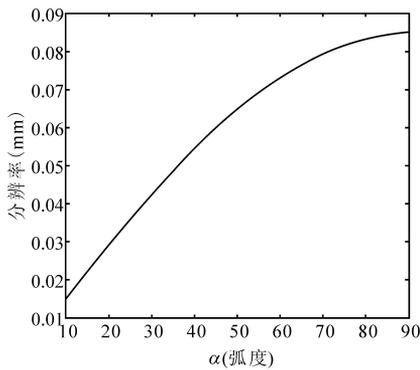
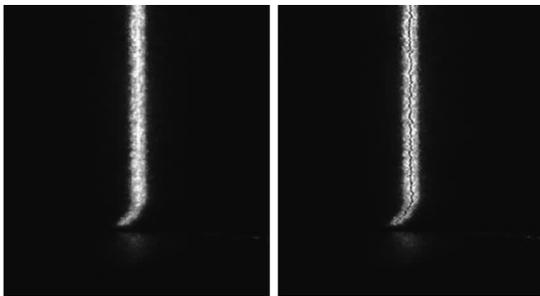
(c) θ 与分辨率的关系(d) α 与分辨率的关系图4 α 和 θ 对分辨率的影响

图5 激光条纹

图6 光条纹中心提取

图5和图6分别为相机拍摄到的清晰激光条纹图和经过中心提取后的条纹图。可以看出,相机不能保证拍摄到完整的光条纹,如果不加处理,会产生一定的误差。故采取对图像进行分割求平均列坐标的方法,将图像按行分成3等份,取中间光条纹恒定的部分求取平均列坐标。

物体的实际移动距离与本文方法求出的移动距离对比见表2。由表可知,本文方法能够准确地计算出测量范围内任意位置待测物体的位移信息,且误差控制在合理范围内。试验结果表明,在 640×480 的图像尺寸下,该位移检测系统输出帧率可达到50帧/秒,表明该系统在满足精度要求的条件下,能同时达到实时检测并输出的目的。

表2 实际位移与插值位移比较

实际位移(mm)	移动像素个数	插值位移(mm)	误差(mm)
3.258	235.768	3.349	0.091
1.578	88.238	1.689	0.111
0.684	13.322	0.622	-0.062
-0.194	-58.723	-0.086	0.108
-1.283	-150.791	-1.392	-0.109
-2.383	-240.699	-2.265	0.118

4 结语

以激光三角法测位移原理为基础,将非线性的物面和像面位移关系转变成线性关系,简化系统标定过程的同时减小了系统误差。对相机采集到的光条纹图像进行分割预处理,利用灰度重心法求平均列坐标信息,采用最小二乘法对数据进行处理。结合嵌入式系统便携、性能强大的优点,微位移实时检测系统实现了高精度、实时检测的目的。

参考文献

- [1] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113 - 125.
- [2] 汤强晋. 激光三角法在物体三维轮廓测量中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [3] 费业泰. 误差理论与数据处理(第六版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 章金敏. 基于激光三角法的物体三维轮廓测量系统[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [5] 曹红超, 陈磊, 王波, 等. 一种改进型高精度激光三角位移传感器的结构设计研究[J]. 激光杂志, 2007, 28(6): 14 - 15.
- [6] 邹振书, 李喜增, 张景和, 等. 非接触测量激光光学探头[J]. 光学精密工程, 1997, 5(3): 83 - 89.
- [7] 吴振刚, 高则仁. 三角法非接触式直升机旋翼结冰探测技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 327 - 332.

第一作者: 王云飞, 硕士研究生, 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 230009 合肥市

First Author: Wang Yunfei, Postgraduate, School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China