

文章编号: 0253-2239(2009)06-1519-04

基于图像处理的钢钢尺自动检测系统

徐新华¹ 王青¹ 钱峥² 张社先²

(¹南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094; ²南京市计量监督检测院, 江苏 南京 210037)

摘要 为实现钢钢尺刻线分划误差的自动检测, 研制了一套基于图像处理的钢钢尺自动检测系统。待测刻线经光学显微系统成像, 由数字 CCD 摄像头采集并传输到计算机中, 利用数字图像处理技术对刻线的边缘进行提取, 结合双频激光测距仪的读数, 自动判读出刻线中线相对于起测分划的位置坐标, 计算出刻线分划误差。由测量重复性引起的不确定度为 $0.79 \mu\text{m}$, 总的展伸不确定度为 $3.9 \mu\text{m}$, 优于国家标准中规定的 $6 \mu\text{m}$ 。整套系统集成光、机、电、算于一体, 操作简便, 测量精度高。

关键词 光学测量; 图像处理; 钢钢尺; 刻度误差

中图分类号 TN247; TP317.4; TP319 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1519

Automatic Measurement System of Invar Rods Based on Image Processing

Xu Xinhua¹ Wang Qing¹ Qian Zheng² Zhang Shexian²

¹ School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

² Nanjing Institute of Measurement and Testing Technology, Nanjing, Jiangsu 210037, China

Abstract In order to realize the automatic measurement of the invar rod scale errors, an automatic measurement system of invar rods based on image processing is proposed. The scale line under test is imaged by a microscope. The scale line image is acquired and transmitted to the computer by a digital CCD video camera. Digital image processing technology is used to extract the scale line edges. Then the scale midline position coordinate originated from the first-measured scale line can be estimated automatically. The scale error is calculated out. The uncertainty from measurement repeatability is about $0.79 \mu\text{m}$ and the extended uncertainty in the measurement is about $3.9 \mu\text{m}$ which excels the $6 \mu\text{m}$ prescribed in the national standard. The whole system integrates optics, mechanics, electrics and computer together and can be operated conveniently with high accuracy.

Key words optical measurement; image processing; invar rod; scale error

1 引 言

钢钢尺也叫钢瓦尺或钢瓦水准标尺, 是水准标尺的一种, 有 1 m、2 m、3 m 等几种型号, 分格值有 10 mm 和 5 mm 两种, 有两排分划。它比一般的水准标尺有更好的特性和更高的精度, 成为精密的水准测量首选。

钢钢尺的分划精度直接影响测量结果的准确性

与可靠性, 必须对钢钢尺的分划精度进行定期检测。目前计量部门对钢钢尺的检验方法主要有两种^[1~3]: 其一是采用光学读数显微镜进行目视测量; 其二是采用光电显微镜瞄准, 配以双频激光干涉仪测量。第一种检测方法不仅繁琐, 消耗时间, 计算量大, 而且由于采用目视方法对准, 产生的误差也比较大; 相比于第一种方法, 第二种方法虽提高了检定速度和精度, 但系统结构复杂, 需要比较复杂的信号接

收稿日期: 2008-09-17; 收到修改稿日期: 2008-10-27

基金项目: 南京市计量监督检测院资助课题; 南京理工大学科研发展基金(AB96234)资助课题。

作者简介: 徐新华(1972-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光纤通信与光子器件、光学计量测试等方面的研究。

E-mail: xxhfwx@163.com

收、处理电路及照明系统。另外,由于采用的是光电显微瞄准器固定,水准标尺移动的检测方法,对于 3 m 的钢钢尺的检测来说,需要 6 m 长的导轨,并要求很高的导轨直线度,这给机械加工带来困难。

本文在现有仪器设备的基础上,研制了一套钢钢尺自动检测系统。采用待测标尺固定,而显微摄像系统移动的方案,角锥反射镜加装在显微镜左侧,用以反射激光,并可随整个显微摄像系统移动,移动的距离可由测距仪实时获得。这样,检测 3 m 长的标尺,只需要 3 m 长的导轨;待测标尺刻线经显微放大系统成像,由 CCD 采集进入计算机,再使用图像处理技术,自动判读出中线,无需瞄准;系统软件功能包括:视频图像的采集、显示,图像处理;检测功能的实现;与激光测距仪之间的实时数据通讯与控制;刻线分划误差计算与分析;检测报告的自动输出与保存。

2 系统结构与测量原理

钢钢尺自动检测系统是光、机、电、算一体化系统,系统主要由测量工作台、双频激光测距仪、可移动的显微摄像系统、计算机和软件等组成,其结构如图 1 所示。

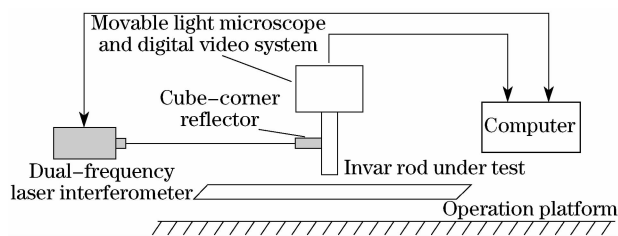


图 1 系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of system structure

测量工作台是由一台三米投影测长机改装而成,增加了滑动承台和水准标尺多维调整承台,待测标尺摆放在多维调整平台上,便于调整;显微摄像系统安装在滑动承台上,位于待测标尺的上方。由手轮控制,可以沿测长机导轨平滑的移动,用以瞄准标尺刻线。光学显微摄像系统是由一台显微镜经过改造而成,目镜部分改为数字 CCD 摄像头,角锥反射镜加装在显微镜的左侧,用以反射激光。显微摄像系统还包括一个照明灯和一个杠杆表,照明灯用来增加待测标尺表面的照度,提高成像质量;杠杆表则用于检测标尺的平行度,确保标尺轴向与导轨平行、尺面保持水平,以提高检测的精度。显微光学系统将刻线图像精确成像在摄像头靶面上,该系统包括多种倍率的显微物镜(3 倍、10 倍、20 倍等)。通过

更换物镜,可灵活适用于不同刻线宽度的线纹尺的检测;图像接收采用高分辨率的数字 CCD 摄像头,信息量大、精度高,并通过 USB 接口与计算机连接,将图像实时转换为标准视频信号,在计算机屏幕上显示,供操作者监视、观察。双频激光测距仪为英国雷尼绍(RENISHAW)公司生产的 He-Ne 双频激光测距仪,不仅具有高精度的测距功能,而且带有传感器,可以实时获得环境温度、湿度、气压等参数以及材料的温度。并可设置材料的膨胀系数,双频激光测距仪通过专用接口与计算机相联。整个仪器的工作状态、环境参数以及距离读数都通过系统软件实时显示计算机屏幕上,便于操作者监视与控制。系统软件采用 VC++ 编写,包括视频显示、图像采集、图像处理、与双频激光测距仪的数据通信、数据计算与分析、检测操作界面、检测结果的输出与保存等功能,界面友好,使用方便。

当转动粗调手轮,滑动承台携带整个显微摄像系统和角锥反射器移动时,双频激光测距仪即进行位移测量;当显微镜物镜瞄准标尺待测刻线时,刻线经光学显微镜成像,由 CCD 摄像头采集到计算机中,再利用数字图像处理技术,对刻线的边缘进行提取,进而判读出刻线的中线。结合双频激光测距仪的读数,可获得刻线中线的相对位置坐标;对每一待测分划刻线重复上述过程,计算出整个标尺的分划误差,即完成一次测量。

3 数字图像处理

刻线中线自动判读包括以下步骤:

1) 刻线原始图像的获取

图 2 示出钢钢尺刻线的原始图像。由图可知,刻线的边缘并不规则、尺面有污损且光照不均匀、对比度小。显然,用该原始图像很难进行刻线边缘提取。针对原始图像的上述特性,在边缘提取前,需对原始图像进行一系列的预处理。



图 2 钢钢尺刻线原始图像图

Fig.2 Original image of the scale line

2) 消除光照不均匀

由于采用普通照明灯照射尺面时,局部反射光过强,造成图像亮度分布不均匀的特点如图 2 所示。黑色刻线的下方由于反射光太强,使得本是低灰度值的黑色刻线,表现出高灰度值来。为了消除这一影响,获取一幅同样照明条件下,钢钢尺背景(无刻线的白色区域)图像,然后将原始图像与背景图像相减,即可消除光照不均匀现象;再采用线性对比度展宽^[4],进一步增强刻线图像的对比度,使之更加清晰。图 3 示出消除光照不均匀后的刻线图像。

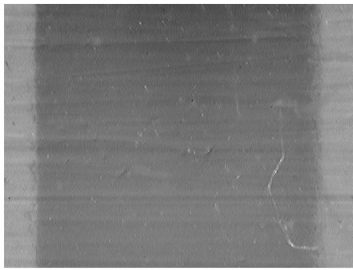


图 3 消除光照不均匀后的刻线图像

Fig. 3 Image of the scale line after eliminating the influence of the non-uniformity of the illumination

3) 图像均值化

由图 3 可知,经过初步处理的图像具有比较好的对比度和清晰度,但是刻度线的边缘仍然不整齐。因此还要对图像进行进一步的均值化处理,即对图像每一列的灰度值相加求平均,让平均值代替图像每一列的灰度值。

4) 刻线边缘提取

物体的边缘是由灰度不连续性所反映的。边缘的特征是沿边缘走向的像素变化平缓,而垂直于边缘方向的像素变化剧烈。经典的边缘检测方法是构

造对像素灰度级阶跃变化敏感的一阶或二阶微分算子^[4],近年来,由于图像处理技术发展迅速,又有不少学者提出一些新的边缘检测算法^[5~7]。

系统中要提取的是经过均值化处理后的刻线边缘。提取出的刻线边缘应是直线,因此无须使用复杂的边缘提取算子进行计算,直接分析均值化后的刻线的灰度值与所在列数的关系(如图 4 所示),找出灰度变化最大的像素点。对应的列坐标就是刻线边缘的列坐标,中线的像素坐标即可通过刻线左右边缘的列坐标计算获得。这种方法的计算量小、速度快,更适合实时处理。

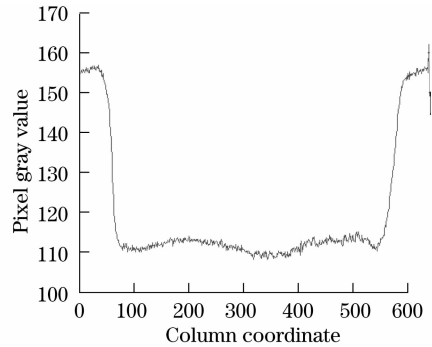


图 4 均值化处理后的刻线图像像素灰度值与列坐标之间的关系

Fig. 4 Pixel gray-value versus column coordinates after averaging processing

4 实测结果与测量不确定度分析

表 1 列出了中华测绘仪器厂 08 号钢钢尺分划误差检测结果。表中共给出 5 组测试数据,各组数据测试时间间隔为 15 min,测量时环境温度在 20.2~20.7 °C 之间。起测分划为 060 分划。

表 1 钢钢尺分划误差测试结果

Table 1 Error test results of invar rod

Scale normal value /mm	Scale measured value /mm					Scale error / μm				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
600	600.0000	600.0000	600.0000	600.0000	600.0000	0	0	0	0	0
700	700.0048	700.0051	700.0048	700.0044	700.0040	+4.8	+5.1	+4.8	+4.4	+4.0
800	799.9956	799.9957	799.9941	799.9960	799.9956	-4.4	-4.3	-5.9	-4.0	-4.4
900	900.0048	900.0035	900.0047	900.0023	900.0028	+4.8	+3.5	+4.7	+2.3	+2.8
1000	1000.0081	1000.0092	1000.0081	1000.0079	1000.0071	+8.1	+9.2	+8.1	+7.9	+7.1
1100	1099.9977	1099.9957	1099.9969	1099.9963	1099.9958	-2.3	-4.3	-3.1	-3.7	-4.2
1200	1199.9841	1199.9823	1199.9845	1199.9837	1199.9838	-15.9	-17.7	-15.5	-16.3	-16.2
1300	1299.9967	1299.9983	1299.9980	1299.9984	1299.9988	-3.3	-1.7	-2.0	-1.6	-1.2
1400	1400.0002	1399.9991	1399.9998	1399.9995	1399.9997	+0.2	-0.9	-0.2	-0.5	-0.3
1500	1499.9975	1499.9971	1499.9977	1499.9970	1499.9989	-2.5	-2.9	-2.3	-3.0	-1.1
1600	1600.0074	1600.0089	1600.0090	1600.0068	1600.0078	+7.4	+8.9	+9.0	+6.8	+7.8

分析测量原理可知,显著影响测量不确定度的因素主要有:测量重复性引起的不确定度分量 u_1 ; 双频激光测距仪测量误差引起的标准不确定度分量 u_2 ; 阿贝误差引起的标准不确定度分量 u_3 ; 显微摄像系统误差引起的标准不确定度分量 u_4 ; 计算机图像处理误差引起的标准不确定度分量 u_5 。其中不确定度分量 u_1 应采用 A 类评定方法,其余不确定度分量应采用 B 类评定方法^[8~10]。

由表 1 可知,总共对 10 个被测量(700~1600 mm 分划)在重复性条件下均进行了 5 次独立测量,则可得合并样本标准差 σ_p 为

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{10 \times (5-1)} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} = 0.79(\mu\text{m}),$$

故由测量重复性引起的不确定度分量 $u_1 = 0.79 \mu\text{m}$ 。

根据仪器说明书,双频激光测距仪的测量误差为 $\pm(0.16 + 0.5 \times L) \mu\text{m}$, L 以 m 为单位,为最大测量长度当 $L = 1.6 \text{ m}$ 时,产生的误差为 $\pm 0.96 \mu\text{m}$ 。取均匀分布,由此引起的标准不确定度分量 $u_2 = 0.96/\sqrt{3} \mu\text{m} = 0.55 \mu\text{m}$ 。

本系统中激光束距离待测尺面的高度为 50 mm,测长机导轨的直线度为 $6''$ 。因不符合阿贝原则,引入阿贝误差 $\pm 50 \times 10^3 \times \tan 6'' = \pm 1.5 \mu\text{m}$ 。取均匀分布,由此引起的标准不确定度分量 $u_3 = 1.5/\sqrt{3} \mu\text{m} = 0.87 \mu\text{m}$ 。

显微摄像系统的误差主要受离焦误差、待测钢尺尺面的起伏等因素影响,经实测和计算,约为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 。取均匀分布,则由此引起的标准不确定度分量 $u_4 = 2.0/\sqrt{3} \mu\text{m} = 1.15 \mu\text{m}$ 。

计算机图像处理时产生的误差范围为 ± 0.5 个像素,物镜倍率等于 3 倍时,每一像素相当于 $3 \mu\text{m}$ 。取均匀分布。因此,由于计算机图像处理误差引起的标准不确定度分量 $u_5 = 1.5/\sqrt{3} \mu\text{m} = 0.87 \mu\text{m}$ 。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} =$$

$$\sqrt{0.79^2 + 0.55^2 + 0.87^2 + 1.15^2 + 0.87^2} \mu\text{m} = 1.94 \mu\text{m},$$

取包含因子 $k = 2$,则测量的展伸不确定度为

$$U = ku_c = 2 \times 1.94 \mu\text{m} \approx 3.9 \mu\text{m}.$$

该结果已经优于国家标准中要求的准确度不低于 $6 \mu\text{m}$ 的检定标准装置。根据以上不确定度分析,说明系统有很好的测量重复性,但测量精度还可进一步提高,还需要做进一步的改进。目前正在对光学显微镜进行改换,准备改用景深范围更大的显微镜,这样能满足钢带水平放置时,由于重力作用

引起的尺面起伏,使得所有刻度都能清晰成像,进一步提高测量精度。

5 结 论

系统采用实时视频显示、图像采集与处理、实时数据通信技术。通过软件界面,操作者在在对钢尺刻线图像进行实时采集的同时,还可实时监控双频激光测长仪的工作状态、环境参数、读数。整个检测过程只需一人操作即可完成,测量结果分析、数据报表、图表在测量完成后即可自动生成,显著提高了检测效率和测量精度。

参 考 文 献

- JJG8-91. *Verification Regulation of Level Rod* [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992
- JJG8-91. 水准标尺检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,1992
- Li Xin, Zhao Niannian. Study on the automatic measurement system of invar leveling rod[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 1994, **19**(2):130~139
- 李 信, 赵念念. 因瓦水准尺自动检测系统的研究[J]. *测绘学报*, 1994, **19**(2):130~139
- Huang Qihong, Qiu Zongming, Guo Yanzhen *et. al.*. New photoelectric collimation method for measuring the code-bar grade rod[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(7):52~54
- 黄秋红, 邱宗明, 郭彦珍 等. 编码水准标尺检测的光电瞄准新方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(7):52~54
- Zhu Hong. *Foundation of Digital Image Processing* [M]. Beijing: Science Press. 2005
- 朱 虹. 数字图像处理基础[M]. 北京:科学出版社,2005
- Cao Wanpeng, Che Rensheng, Ye Dong. Illumination-independent wavelet scale multiplication edge detection method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10):1751~1757
- 曹万鹏, 车仁生, 叶 东. 一种照明无关的小波多尺度相乘边缘检测方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1751~1757
- Wu Haibin, Yu Xiaoyang, Guan Congrong. Structure light encoding stripe edge detection based on gray curve intersecting point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6):1085~1090
- 吴海滨, 于晓洋, 关丛荣. 基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6):1085~1090
- Guo Haitao, Tian tan, Wang Lianyu *et al.*. Image segmentation using the maximum entropy of the two-dimensional bound histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):506~509
- 郭海涛, 田 坦, 王连玉 等. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):506~509
- Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press. 2005
- 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2005
- The Metrology Department of State Quality and Technical Bureau. *Guide to the Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005
- 国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南[M]. 北京:中国计量出版社,2005
- The Metrology Department. *Length Metrology* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007
- 计量司. 长度计量[M]. 北京:中国计量出版社,2007