

文章编号:1002-2082(2015)02-0259-07

基于双频激光干涉仪的显微模板精密测量

薛媛,陈青山,刘力双,吕勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

摘要:为了对光纤阵列测量的高精度显微模板进行精密检测,采用双频激光干涉仪结合显微视觉系统,通过骨架化、腐蚀法、质心法等算法对显微图像进行计算处理,实现模板特征刻线的提取与精确定位。对模板上8条刻度线之间的间距分别进行重复测量和组合测量,实验结果表明重复测量的标准偏差不大于 $0.07\ \mu\text{m}$,组合测量的标准偏差不大于 $0.04\ \mu\text{m}$ 。介绍了测量系统构成与工作原理,并对测量过程进行了精度分析,分析结果表明测量过程的极限误差不大于 $0.10\ \mu\text{m}$ 。

关键词:显微视觉;双频激光干涉仪;光纤阵列;精密测量

中图分类号:TN247

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0203004

Precision measurement of microscopic module through dual-frequency laser interferometer

Xue Yuan, Chen Qingshan, Liu Lishuang, Lyu Yong

(School of Instrumentation Science and Opto-Electric Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to accurately measure the high-precision microscopic module of optic fiber array, a method combined a dual-frequency laser interferometer with a micro-vision system was adopted. The characterized scale was extracted and located precisely from the micro-vision image by way of skeletonization, erosion algorithm and the centroid method. The spaces between 8 scales were repetitively measured, with the maximum standard deviation being no more than $0.07\ \mu\text{m}$. These 8 scales were further measured through the combination method, with the maximum standard deviation being no more than $0.04\ \mu\text{m}$. The configuration and principle of the measurement system were described. Accuracy analysis indicates that the limit error of the method is less than $0.10\ \mu\text{m}$.

Key words: micro-vision; dual-frequency laser interferometer; fiber array; precision measurement

引言

显微模板常用于机器视觉、视觉测量、三维重建等领域,主要用于校正显微系统镜头畸变,确定空间物体与图像中对应点的相互关系,以及确定空间物理尺寸和像素间的相互关系^[1-4]。视觉测量所使用的模板一般分为一维标定板、平面标定板和三维标定板3种,对于显微视觉测量,由于显微

镜放大倍率高、视场小、景深浅^[5]等特点,一般选用平面显微模板。显微模板要求精度较高,一般通过光刻技术和湿法刻蚀技术制作,其精度主要表现为模板上刻度线的位置精度。目前常用模板图案有棋盘格、圆形点阵和相交线段等。在测量精密元器件的显微视觉系统中,例如光纤阵列测量系统中^[6],显微模板可以用作实物标准量,标定

收稿日期:2014-11-19; 修回日期:2015-01-04

基金项目:北京市优秀人才培养资助(2013D005007000007);北京市属高等学校青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201404124)

作者简介:薛媛(1991—),女,湖南益阳人,硕士,主要从事精密仪器及机械研究。E-mail:135-137@163.com

通信作者:陈青山(1971—),男,副教授,主要从事精密测量技术与光电检测技术研究。E-mail: chenqss@sina.com

系统放大倍率和畸变等,同时为图像处理过程提供辅助特征。很大程度上,系统测量精度取决于显微模板的精度,即显微模板上刻度线的位置与间距的精度,因此有必要对显微模板进行精密测量。显微模板上特征要素尺度小,加工精度高,一般直接按照加工精度使用,例如用来标定摄影测量或者机器视觉系统,对显微模板特征线尺寸及位置精度的标定方面的研究报道很少^[7-8]。双频激光干涉仪具有测量精度高、非接触、测量速度快、测量范围大、分辨率高等优点,可以完成超高精度(nm级)的位移精密测量^[9-11]。本文介绍一种基于双频激光干涉仪的显微模板精密测量系统和方法,采用显微视觉系统捕获刻度线图像,借助骨架化和腐蚀算法实现刻度线提取,用质心法完成刻度线中心定位,从而实现高精度瞄准。

1 测量系统与原理

被测显微模板用于光纤阵列纤芯距精密测量^[12]。其作用包括:1) 提供测量标准量,标准量体现为模板上精密刻度的刻度线间隔;2) 提供辅助图像特征,以便通过图像拼接算法还原整个光纤阵列的端面信息,同时可以校正扫描测量光纤阵列时微位移平台的微小偏转量。在基于显微视觉的光纤阵列扫描测量过程中,光纤阵列端面与显微模板贴合,由 CCD 依次采集经过放大的显微图像,每幅图像中包括相邻 2 个纤芯端面和来自显微模板的辅助刻度线,其中第 1 个纤芯即为上一幅图像中的第 2 个纤芯。因为扫描微位移平台并非严格地沿着直线运动,导致连续采集幅图像的坐标并不统一。为了精确获取被测光纤阵列纤芯距信息,如图 1 所示,就必须将依次采集的所有图像进行拼接,形成包含所有被测纤芯的整幅图像,进而通过目标识别与信息提取,计算被测光纤阵列的纤芯距。

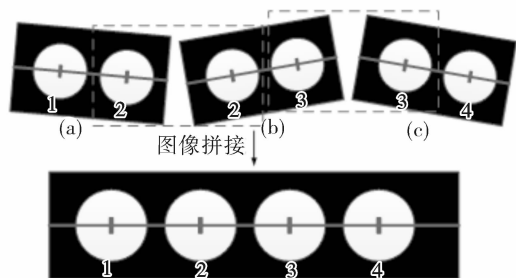
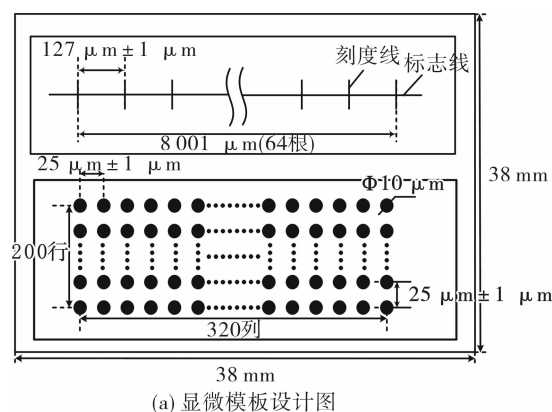


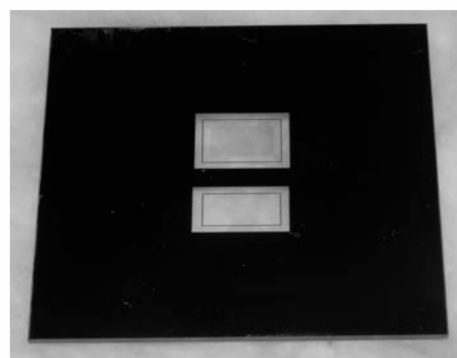
图 1 显微模板的使用过程

Fig. 1 Splicing of scanned images

为实现上述目的,所设计的显微模板图形及实物见图 2(a)和 2(b),所需图形特征通过微纳米光刻工艺加工而成。用于提供测量标准的刻度线位于模板上半部,横向长实线为标志线,纵向短实线为刻度线。因基于 V 型槽的光纤阵列两根纤芯之间的理论距离应为 $127\ \mu\text{m}$ ($250\ \mu\text{m}$)^[13-14],显微模板标志线上的刻度线之间的距离设计为 $127\ \mu\text{m}$ 。光纤阵列在实际使用时,常用 4、8、16、32、64 等不同通道数,因此在模板上加工了 64 条刻度线,可用于测量 64 通道以下的光纤阵列。模板下半部分是一个圆形点阵,用于对显微系统相差进行标定。



(a) 显微模板设计图



(b) 显微模板实物

图 2 显微模板

Fig. 2 Microscopic module

由上述可知,显微视觉系统对光纤阵列的测量精度取决于显微模板刻度线的尺寸与位置精度,因此有必要对显微模板上的刻度线间距进行精密标定。因显微模板上刻度线微小、易划伤,宜采用非接触光学瞄准完成测量。又因为测量要求精度高,所以选用双频激光干涉仪来测量显微模板刻度线间距,如图 3 所示。系统主要由光学气浮隔震实验平台、双频激光干涉仪、显微视觉模块、微位移运动模块以及图像处理软件模块组成。其

中,显微视觉模块由显微镜、CCD 摄像头、图像采集卡、显微模板、显微模板夹具组成;微位移运动模块由 Newport 的运动控制器 esp300 和调焦模块组成;图像处理由 MATLAB 图像处理软件完成。系统使用的双频激光干涉仪是普锐科创科技有限责任公司 PT-1001B,工作距离 5 m,位移分

辨率为 1 nm,系统精度为 $1\mu\text{m}/\text{m}$ (配合 1316A/1317A 传感器);显微镜采用日本 OLYMPUS 公司的 CX31 生物显微镜;CCD 型号是高分辨率数字摄像机 MVC3000,最大幅面为 $2048\text{像素} \times 1536\text{像素}$,像元尺寸为 $3.2\mu\text{m} \times 3.2\mu\text{m}$ 。

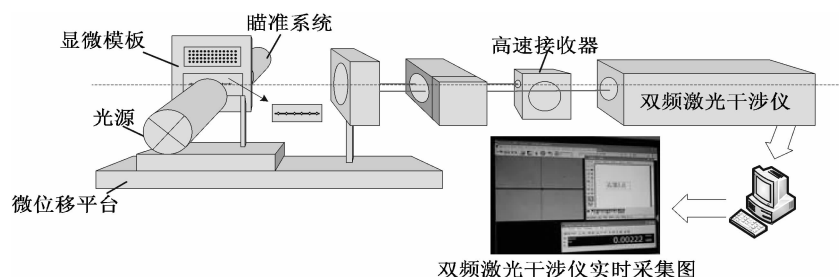


图3 显微模板测量系统

Fig.3 Experimental system for measuring microscopic module

微位移平台承载显微模板、模板夹具以及双频激光干涉系统的测量反射镜一起运动,采用显微视觉系统进行瞄准,如图4所示。显微视觉软件平台在实时图像上提供十字指示线,可用于刻度线对准。但由于微位移平台最小运动步距为 $0.5\mu\text{m}$,测量过程中无法实现刻度线图像边沿或者中心与十字指示线的完全重合,因此需要通过图像计算处理来提取刻度线像边沿或者中心与十字指示线的相对位置偏差,从而结合双频激光干涉仪读数得到刻度线间距。

移运动平台,使相邻的下一条刻度线移动到靶心并采集图像,同时记录双频激光干涉仪读数,而后归零。重复上述过程完成所有刻度线间距图像信息采集。最后经过图像分析处理计算刻度线与靶心的位置关系,若有偏差,进行补偿,并计算所有刻度线间距。

尽管双频激光干涉仪的精度很高,足以胜任上述显微模板的测量,但搭建实际测量系统时必须考虑并合理处理若干因素才能保证所需测量精度。这些因素包括:

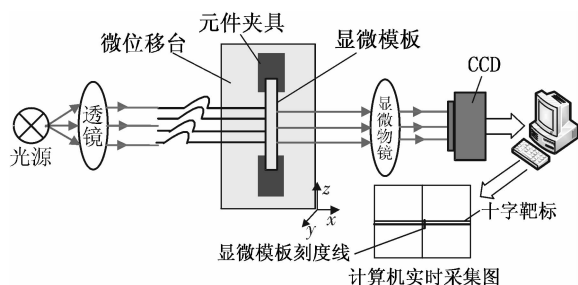


图4 瞄准系统示意图

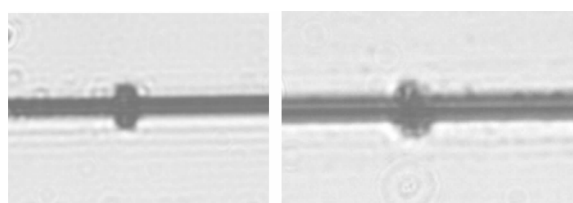
Fig.4 Schematic diagram of aiming system

测量时需启动气浮隔振平台,将双频激光干涉仪与显微模板上的标志线调节到同一水平线上。照明光束垂直照射显微模板,经 $40\times$ 显微物镜放大成像于 CCD 面阵上。然后经图像采集卡把采集到的图像信息传入计算机,驱动微位移运动平台将某条刻度线移动到采集靶心并采集图像,同时将双频激光干涉仪读数归零。再次驱动微位

1) 阿贝误差。显微模板的定位与测量光轴存在位置偏差,由于微位移运动平台不可避免地会有扭摆运动,必然造成一定的阿贝误差。搭建实验系统时,一方面尽可能地将被测尺寸调至与测量激光束共线,另一方面尽可能地使得微位移工作台的运动方向与测量光束方向平行,以减小阿贝误差。

2) 离焦误差。测量过程中,因为显微镜景深很小,显微模板与显微物镜间距(即物距)的微小变动将会导致图像质量恶化,如图5(a)和5(b)所示。因此实验过程中,应先调节好微位移平台运动方向,尽可能使物距保持不变或者变动量可忽略。

3) 显微系统照明。刻度线尺寸与间距都很微小,为保证物方瞄准精度需使用 $40\times$ 显微系统成像,此时视场减小($165\mu\text{m} \times 128\mu\text{m}$),照度要求随之变高。在此照明系统采用输出光强可调的 6 V, 30 W 汞灯作光源,实现各种放大倍率下充足、均匀的照明效果。



(a) 对焦良好

(b) 离焦劣化

图5 对焦瞄准情况对比

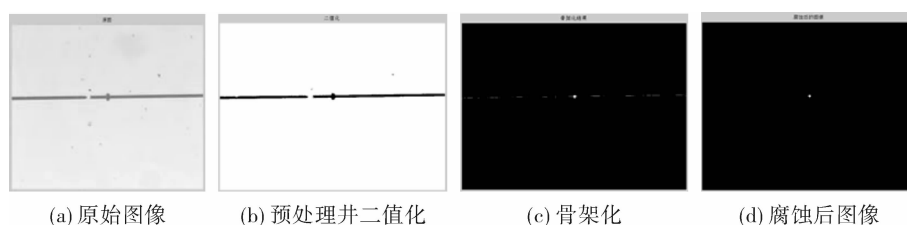
Fig. 5 Focusing and image capturing

4) 测量环境。双频激光干涉仪精度虽高,但对工作环境敏感,因此实际测量工作在夜间进行并使用气浮隔振平台,以减小震动的影响,同时将室内温、湿度尽可能地调节到标准条件。

2 图像处理与刻度线间距计算

显微模板精密测量的数据处理涉及图像采

集、图像预处理、刻度线提取、刻度线坐标计算、补偿值计算、刻度线间距计算等过程。所需提取的特征点为图 6(a)中刻度线的中心坐标,可见刻度线是不规则的形状,无法进行拟合。因此对所采集的图像进行预处理(滤波、增强、灰度变换、二值化)后,需要通过数学形态学中骨架化(细化)^[15-16]和腐蚀算法^[17-19]得到清晰的刻度线像,再通过质心法得到刻度线的中心。提取刻线特征时,直接调用 Matlab 函数 `bwmorph(M, 'skel', n)` 对图像进行 16 次骨架化运算,达到图 6(c)所示效果。然后采用 3×3 矩形算子对骨架化处理后的图像进行腐蚀运算,腐蚀结果如图 6(d)所示。采集的图像中,标志线与刻度线宽度相等,直接采用腐蚀算法效果不明显。因此,先进行细化,再进行腐蚀,可以去掉标志线,留下标志点的中心部分,见图 6(b)~6(d)。



(a) 原始图像

(b) 预处理并二值化

(c) 骨架化

(d) 腐蚀后图像

图6 图像处理过程

Fig. 6 Image processing

刻度线间距计算如图 7 所示,图 7(a)示出了瞄准第 i 条刻度线的情形,由于微位移平台定位分辨率不够高,刻度线中心并未对准十字指示线的竖线,需要通过图像分析处理计算出偏差量 Δ_i 并予以补偿。显而易见,当刻度线中心位于十字线竖线左侧时, Δ_i 符号为正,位于右侧则为负,图中 $\Delta_i = -0.54 \mu\text{m}$ 。类似地,图 7(b)示出的是瞄准第 $i+1$ 条刻度线的情

形,其修正量 $\Delta_{(i+1)}$ 的符号正好与第 i 条刻度线的情形相反,即刻度线位于十字线左侧时为负,位于右侧则为正,图中 $\Delta_{(i+1)} = 0.42 \mu\text{m}$ 。从第 i 条刻度线到第 $i+1$ 条刻度线,微位移平台经过的距离由双频激光干涉仪给出(图中 $x = 127.22 \mu\text{m}$)。于是可计算出 2 条刻度线间距 $X = x + \Delta_i + \Delta_{(i+1)} = 127.22 + (-0.54) + 0.42 = 127.10 \mu\text{m}$ 。

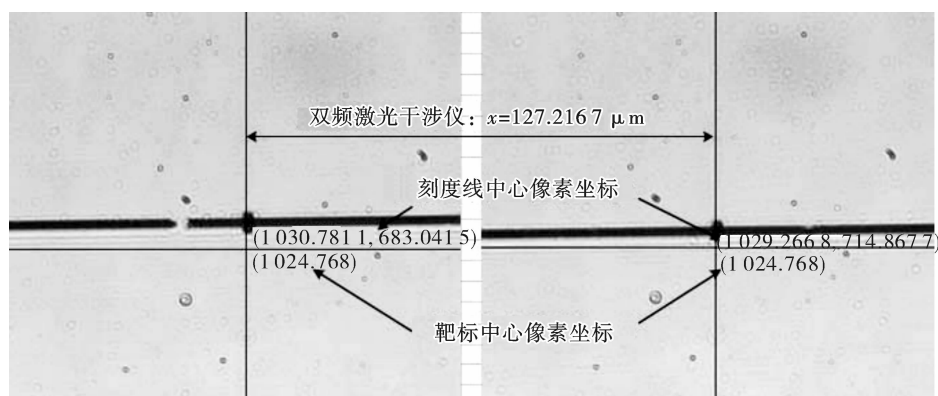


图7 刻度线间距计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of calculation of scale spacing

3 数据处理

分别对被测模板 8 条刻度线间的 7 个间距进行多次重复测量和组合测量,测量数据与处理结果在表 1 和表 2 中列出。

表 1 分别列出了 7 个被测间距 10 次等精度重复测量的算术平均值与标准偏差,可见:刻度线间距与其公称值(设计尺寸)127.00 μm 的最大偏差量为第 5 组,偏差量为 0.19 μm 。最大标准偏差发生在第 1 组,是 0.07 μm 。表 1 中根据 7 组数据的标准偏差,可得到刻度线间距的重复测量标准差

在 0.04 μm ~0.07 μm 之间。

表 2 分别列出了 7 个被测间距组合测量结果,可见:刻度线间距与其公称值 127.00 μm 的最大偏差量在第 5 组,偏差量为 0.20 μm 。最大标准偏差为 0.04 μm 。表 2 中根据 7 组数据的标准偏差,可得到刻度线间距的重复测量标准差在 0.02 μm ~0.04 μm 之间。通过计算数据比较的方法($|\bar{x}_i - \bar{x}_j| < 2\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$)与等精度重复测量结果对比,可知组合测量与多次重复测量数据基本一致,组合测量精度更高。

表 1 刻度线间距重复测量

Table 1 Scale spacing results from repeated measurements

项目	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组
算术平均值/ μm	126.90	127.13	126.98	127.18	126.81	127.05	127.07
标准差 σ / μm	0.07	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06

表 2 刻度线间距组合测量

Table 2 Measured scale spacing through combination method

项目	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组
最小二乘估计值/ μm	126.97	127.09	126.96	127.16	126.80	127.10	126.94
标准差 σ / μm	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04

以上采用双频激光干涉仪作为标准量来检测显微模板的测量不确定度,涉及若干随机误差与未定系统误差,分析如下:

1) 阿贝误差 δ_1 。按最坏情况计算(导轨精度允差最坏为 8", 双频激光干涉仪测量轴线与被测物体所在直线的偏差不大于 1 mm),阿贝误差:

$$\delta_1 \leq H \cdot \theta = \frac{8 \times 5 \times 1 \times 10^6}{10^6 \times 10^3} \mu\text{m} = 0.4 \mu\text{m}。$$

2) 仪器自身误差 δ_2 。双频激光干涉仪系统精度为 1 $\mu\text{m}/\text{m}$,实际使用 1313B 传感器,估计系统精度最坏情况为 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。自身误差 $\delta_2 \leq L \cdot 10 \cdot 1 \mu\text{m}/\text{m} = 0.009 \mu\text{m}$,其中 L 为被测刻度线尺寸($L = 127 \mu\text{m} \times 7 = 889 \mu\text{m}$)。

3) 瞄准误差 δ_3 。选用的 CCD 像元尺寸为 3.2 $\mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$,放大倍率为 40 \times ,图像处理定位

精度不超过 0.5 个像素。由以上参数可以推出,系统瞄准精度为

$$\delta_3 \leq \frac{\text{Size} \times \text{Pixel}}{\beta} = \frac{3.2 \mu\text{m} \times 0.5}{40} = 0.04 \mu\text{m}。$$

4) 温度所引起的误差 δ_4 。 $\delta_4 \leq L \cdot \alpha(T - 20) = 0.002 \mu\text{m}$,其中 δ_4 为最大尺寸变化量, L 为被测刻度线尺寸($L = 127 \mu\text{m} \times 7 = 889 \mu\text{m}$), α 为显微模板线膨胀系数(石英玻璃 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$), T 为温度(取 25 $^\circ\text{C}$)。

5) 测量重复性极限误差 δ_5 。按照组合测量标准差(取 0.04)估计,取包含因子 $k = 2$ (置信概率 95%),则 $\delta_5 \leq 0.04 \times 2 = 0.08 \mu\text{m}$ 。

因上述各分量互不相关,相关系数为零,合成极限误差为 0.098 μm ,取 0.10 μm ,于是有如下公式:

$$\delta \leq \pm \sqrt{\sum_{i=1}^5 \delta_i^2} = \pm \sqrt{(0.04)^2 + (0.009)^2 + (0.04)^2 + (0.002)^2 + (0.08)^2} \mu\text{m} = 0.10 \mu\text{m}。$$

4 结论与讨论

研究了一种采用双频激光干涉仪精密测量显微模板刻度线间距的方法,该显微模板用于为光纤阵列纤芯距精密测量显微视觉系统提供标准量和辅助图像特征。在稳定的实验环境下,采用数字显微系统瞄准被测刻度线并通过图像处理计算瞄准偏差给出瞄准修正值,采用双频激光干涉仪读取微位移平台的位移。对8条刻线之间的7个间距分别完成了等精度重复测量(10次)和组合测量,并对比分析测量结果。通过数据分析,组合测量系统重复测量标准差为 $0.04\ \mu\text{m}$ 。经过精度分析,该方法的测量极限误差不大于 $0.10\ \mu\text{m}$ 。所给出的基于双频激光干涉仪的显微模板精密测量系统和方法可用于精密线纹类标准量的测量与检定。

参考文献:

- [1] Wang Bingzhen, Liu Wenyao. Camera calibration method for micro-image measuring system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 119-122.
王兵振, 刘文耀. 一种显微图像测量系统的标定方法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 119-122.
- [2] Hu Xiaoping, Chen Guoliang, Yang Xiaoyan, et al. Research on micro-vision system of micro-manipulator[J]. Process Automation Instrumentation, 2007, 28(2): 5-9.
胡小平, 陈国良, 阳小燕, 李俊. 微操作机器人显微视觉系统研究[J]. 自动化仪表, 2007, 28(2): 5-9.
- [3] Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct linear transformation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 488-494.
葛宝臻, 李晓洁, 邱实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 488-494.
- [4] Ma Chengjian, Shi Fei, Wang Haoli. Study on 3D micro-scale measurement based on stereo-microscopic images[J]. Journal of China University of Metrology, 2013, 24(4): 340-346.
麻程健, 史飞, 王昊利. 立体显微图像的三维微尺度测量方法研究[J]. 中国计量学院学报, 2013, 24(4): 340-346.
- [5] Dong Jianjun, Liu Zhongli, Miao Wenyong. Imaging simulation of KBA microscope system and X-ray imaging experiment[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(8): 1231-1235.
董建军, 刘忠礼, 缪文勇. KBA 显微镜成像系统的成像模拟及 X 光成像实验的研究[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1231-1235.
- [6] Hsu S W, Jiaan Y D, Huang M S. Measurement of core position of fiber array by a calibrated mask method[J]. Key Engineering Materials, 2005, 295-296: 227-232.
- [7] Hu Hao, Liang Jin, Tang Zhengzong, et al. Calibration of stereo microscope measurement systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 1985-1994.
胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 1985-1994.
- [8] Li Junlan, Zhang Dawei, Wang Yizhong, et al. Micro-vision positioning systems for IC packaging[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 965-972.
李君兰, 张大卫, 王以忠, 等. 面向 IC 封装的显微视觉定位系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 965-972.
- [9] Quenelle R C. Nonlinearity in interferometric measurements[M]. USA: Hewlett-Packard J, 1983.
- [10] Bobroff N. Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity[J]. Applied Optics, 1987, 26(13): 2676-2682.
- [11] Zeng Zhaoli, Zhang Shulian. Nanometrology technology in precision measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 846-854.
曾召利, 张书练. 精密测量中的纳米计量技术[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 846-854.
- [12] Wang Runlan, Chen Qingshan. Precision measurement of fiber array based on micro-vision[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3): 288-292.
王润兰, 陈青山. 基于显微视觉的光纤阵列精密测量研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 288-292.
- [13] Liang Jingqiu, Hou Fengjie. One dimension optical fiber array with silicon V-grooves[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 89-94.
梁静秋, 侯凤杰. 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 89-94.
- [14] Chen Liguang, Zhu Jifeng, Wang Mingyue. Detection system for distances between the fiber centers in fiber array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 728-732.
陈立国, 朱吉峰, 王明月. 光纤阵列中纤芯间距的检测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 728-732.

- [15] Mu Shaomin, Du Haiyang, Su Ping, et al. A new improved fast parallelthinning algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2013, 30(1): 53-55.
牟少敏, 杜海洋, 苏平, 等. 一种改进的快速并行细化算法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(1): 53-55.
- [16] Zhang Ruiying, Zhou Ping, Feng Xu, et al. Rapid extraction of line-structured light stripe in large field of view[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 432-436.
张瑞瑛, 周萍, 冯煦, 等. 大视场下线结构光光条中心的快速提取[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 432-436.
- [17] Li Min, Jiang Jianchun. The study of image edge detection based on erode algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(1): 82-84.
李敏, 蒋建春. 基于腐蚀算法的图像边缘检测的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(1): 82-84.
- [18] QI Xin. Digital signal processing technology based on dilation and erosion algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2010, 29(10): 76-79.
齐鑫. 基于膨胀腐蚀算法的数字信号处理技术[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(10): 76-79.
- [19] Li Yuanfeng, Li Zhengsheng, Wang Yang. Center location of circle target captured by CCD camera[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 956-960.
李元锋, 李正生, 王洋. CCD摄像头圆目标中心定位方法[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 956-960.