

白光干涉轮廓仪空间扫描范围自适应规划方法

马 龙, 吕 毅, 裴 昕, 焦智超, 张鸿燕, 胡艳敏

中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300

摘要 为提高白光干涉轮廓仪的测试效率,提出了一种空间扫描范围自适应规划方法。构建了相应的测试系统,选择能量梯度函数用于系统最佳干涉位置的定位。使用 ViBe 算法对最佳干涉位置处电荷耦合元件(CCD)图像中的干涉条纹进行提取,并对提取结果进行二值化处理。实验结果表明,该方法能够准确识别扫描上下限位置。

关键词 测量; 光学无损检测; 干涉条纹识别; ViBe 算法; 白光干涉轮廓仪; 空间扫描范围设定

中图分类号 TH741.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061202

Adaptive Planning Method of Spatial Scanning Range for White Light Interferometric Profiler

Ma Long, Lü Yi, Pei Xin, Jiao Zhichao, Zhang Hongyan, Hu Yanmin

Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract In order to improve the measurement efficiency of white light interferometric profilers, one new adaptive planning method of spatial scanning range is proposed. The corresponding measurement system is built and the energy gradient function is chosen to locate the optimal interference position. The interference fringes of charge coupled device (CCD) images at the optimal interference positions are extracted with the ViBe algorithm, and then the extraction results are processed by the binaryzation. The experimental results show that the proposed method can accurately identify the positions of the function upper and lower limits.

Key words measurement; optical non-destructive detection; interference fringe identification; ViBe algorithm; white light interferometric profiler; spatial scanning range setting

OCIS codes 120.1088; 120.3180; 120.3940; 120.4640

1 引 言

微纳米尺度精密加工技术的发展使元器件的集成度不断提升,功能性更加完善,同时也为测量带来新的挑战^[1-4]。其中白光扫描干涉术是一种重要的光学无损检测手段,其应用领域不断扩展,成为国内外学者的研究热点。

目前,针对白光扫描干涉术的研究可分为算法研究与系统研究,前者围绕白光干涉信号的产生与处理展开,这部分内容白光扫描干涉术提出后的相当一段时间内占据着该领域研究的主导地位,产生了一系列重要的研究成果,如基于空间频域分析和小波变换的白光干涉信号处理方法等^[5-8]。近年来,针对白光扫描干涉术系统优化与应用领域等方面的研究逐渐呈现出了蓬勃发展的态势。这一方面是精密加工技术发展带来的必然结果,另一方面也是工业领域对目前商用白光干涉轮廓仪性能提升的迫切需求。Viotti 等^[9]比较了白光干涉轮廓仪与探针式轮廓仪测量结果间的差别。Debnath 等^[10]发展了空间频域分析法,设计了新型的测试系统,实现了仅通过一幅干涉图像即可获取待测表面的轮廓信息。Munteanu^[11]研究了改进型的白光

收稿日期: 2016-12-30; **收到修改稿日期:** 2017-02-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1633101)、国家自然科学基金(51205397)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项资助项目(3122014H004)

作者简介: 马 龙(1983—),男,博士,讲师,主要从事无损精密检测、信息融合技术方面的研究。

E-mail: malong9904@aliyun.com

水平扫描干涉轮廓仪,提出了无需倾斜角度信息的数据处理方法,通过一次扫描实现了水平方向大范围的直接测量,无需拼接过程。邹文栋等^[12]利用白光干涉轮廓仪测量了金属断裂区域。Pacholik 等^[13-14]研究了利用图形处理器(GPU)和现场可编程逻辑门阵列(FPGA)处理白光干涉信号时的多线程问题,并对计算效率进行了比较分析。Heikkinen 等^[15-16]研究了白光干涉轮廓仪的照明系统特性及其对干涉信号形态的影响。Dong 等^[17]基于 Linnik 干涉仪搭建了测试系统,并通过自动调焦方法研究了最佳干涉位置的快速搜索方法。此外,一些国内外的学者在白光干涉轮廓仪的应用与系统优化方面进行了许多重要工作^[18-24]。

上述针对系统优化的研究大多集中在系统结构的改进或硬件水平的提升等方面。事实上,一次完整的扫描过程不但包括系统对干涉信号的处理过程,还包括系统测量参数(即空间扫描范围)的设定过程。目前,即使是 Zygo 与 Bruker 公司生产的高端商用白光干涉轮廓仪,为简化上述过程,仍采用人工的方式设定测量参数,即首先手动对焦,然后根据经验设定空间扫描范围。通常,为保证扫描能正常进行,空间扫描范围往往被设置为数十微米甚至更大,这显著降低了系统的测量效率,特别是在大范围测量时。

本文针对上述问题,提出了一种自适应的空间扫描范围划分方法。该方法首先判断最佳干涉区的空间位置,通过 ViBe 方法实现对白光干涉条纹的提取,并通过二值化方法对其进行快速识别。然后以二值化图像中是否存在干涉条纹为依据,驱动系统的运动机构分别定位扫描的上下限位置,实现空间扫描范围的划分。该方法能够根据待测样品的表面形貌自适应设定空间扫描范围,有效提高测试效率。

2 空间扫描范围的定义

白光干涉轮廓仪的空间扫描范围可用于干涉物镜相干区域的位置进行定义,如图 1 所示。图中扫描上限位置为测试样品开始进入干涉区域时的表面最高处位置,即干涉条纹在电荷耦合元件(CCD)视场即将出现时干涉物镜与测试样品的相对空间位置;扫描下限位置为测试样品刚刚退出干涉区域时的表面最低处位置,即干涉条纹刚从 CCD 视场中消失时干涉物镜与测试样品的相对空间位置。扫描上限位置与扫描下限位置之间的垂直距离即定义为白光干涉轮廓仪的空间扫描范围。一次完整的扫描过程实际上就是干涉物镜与测试样品间相对位置的变化过程。实际上,测试样品的表面形貌特点直接决定了空间扫描范围的大小,因此在每次扫描开始前都需要合理设定空间扫描范围。

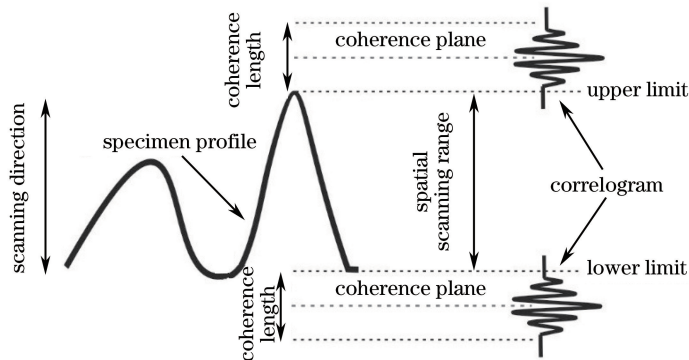


图 1 空间扫描范围定义

Fig. 1 Definition of spatial scanning range

3 测试系统

实验系统如图 2 所示,该系统使用 Nikon 公司 Michelson 型 $5\times$ 干涉物镜,集成了 Nikon 公司 CM30A 型落射显微镜,测试图像通过 Basler 公司 AVA1000-100gm 型 CCD 相机进行采集并传至上位机进行处理。照明部分采用了自主开发的发光二极管(LED)光源。系统采用两级运动机构,其中 PI 公司 P-753 型压电陶瓷移相器(PZT)用于带动干涉物镜完成垂直扫描;Sigma 公司 SGSP26-200 型位移台用于带动整个光学系统快速运动。此外,考虑到系统进一步的开发需求,所有的数据处理工作均通过一台工控机实现,用户上位机仅用于安装系统控制软件,完成指令的发送及测量结果的显示。工控机与 CCD 相机和上位机均通过网

线相连,测试样品放置于手动位移台上,整个系统置于隔振台上,以减少环境振动带来的影响。该系统使用中国电子科技集团第十三研究所制造的 $10\ \mu\text{m}$ 标准台阶进行标定。

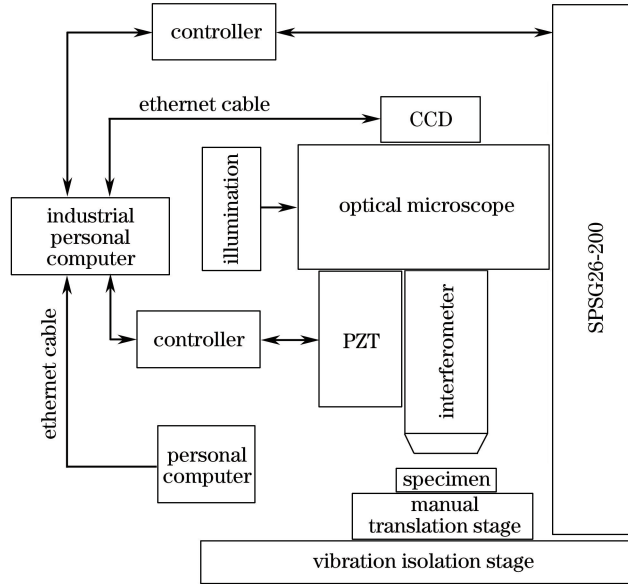


图 2 测量系统简图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

4 空间扫描范围自适应规划方法

4.1 最佳干涉位置的确定

当系统定位到待测区域后,首先要确定最佳干涉位置。最佳干涉位置定义为干涉条纹最大程度布满待测表面时干涉物镜与测试样品的相对空间位置,使用调焦评价函数对上述位置进行判断。虽然自动调焦技术目前的发展较为完备,但并非每种调焦评价函数都适用于视场中存在干涉条纹的情况。正是由于干涉条纹所带来的图像对比度的变化,灰度方差函数和熵评价函数存在着失去单峰性的风险。

对调焦评价函数在视场中存在干涉条纹的情况进行了比较分析,如图 3 和表 1 所示。其中,图 3(a)白色标明区域为待测区域,采集 400 frame 图像,采样间隔为 $0.05\ \mu\text{m}$,最佳干涉位置被设定为 218 frame 图像的位置。图 3(b)为能量梯度函数的评价结果,可以看出评价结果保持了较好的单峰性与无偏性。表 1 为能量梯度函数、梯度滤波器函数(Brenner function)、灰度差分绝对值之和函数(SMD function)和拉普拉斯函数(Laplacian function)的评价结果,其中采用穷举法实现了最佳干涉位置的搜索。

同时比较了不同调焦评价函数的计算效率,以 1000 frame 图像为测试样本,不同调焦评价函数的计算用时如表 2 所示。从中可见,虽然能量梯度评价函数的时间略多于其他三种调焦评价函数的,但仍在可接受的范围内,同时考虑评价的准确性,选用能量梯度函数完成最佳干涉位置的确定。

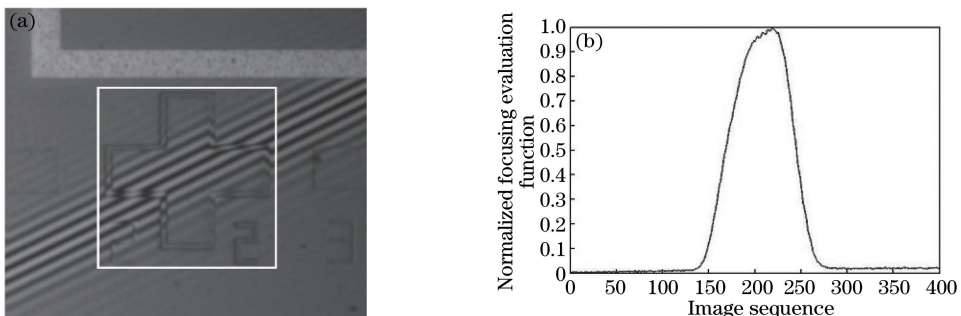


图 3 (a)最佳干涉位置图像;(b)能量梯度函数评价结果

Fig. 3 (a) Image at optimal interference position; (b) evaluation result of energy gradient function

表 1 不同调焦评价函数的评价结果

Table 1 Evaluation results of different focusing evaluation functions

Function	Energy gradient function	Brenner function	SMD function	Laplacian function
Evaluation result /frame	218	220	213	207

表 2 不同调焦评价函数的运行时间

Table 2 Consumption time for different focusing evaluation functions

Function	Energy gradient function	Brenner function	SMD function	Laplacian function
Consumption time /ms	16547	13610	13657	15156

4.2 干涉条纹的识别

针对最佳干涉位置的 CCD 图像,通过 ViBe 算法实现对干涉条纹的提取。ViBe 算法本质上是一种基于背景减法的前景检测方法^[25]。以图像上相邻的点具有近似的空间分布特性为原则,为图像上的每个像素点建立一个由邻域点组成的样本集。在图像采集的过程中,随机的利用相邻像素点的像素值填充该像素的样本集。更为重要的是,ViBe 算法仅用一幅图像即可实现背景模型的初始化,特别适用于处于低照度的显微干涉图像,具有极高的稳健性。

CCD 图像中某一像素点的背景点集可按图 4 的方式建立,以该像素为中心组成 3×3 矩阵,则矩阵中的所有 9 个像素值均有机会被随机的选为该像素的背景点。显然,对于特定长度的背景点集,某些像素点会不止一次被选取。

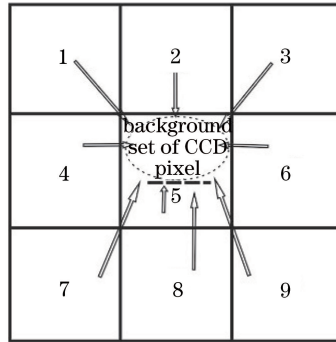


图 4 背景点集的建立

Fig. 4 Establishment of background point set

针对任一像素点所建立的背景点集表示为

$$M(x, y) = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

式中 x 和 y 为该像素点在图像上的坐标, n 为背景点集的长度, $p_1 \sim p_n$ 表示处于该像素邻域的像素。该样本集的选取是随机的。

从第二帧开始计算,设定前景判断阈值及像素灰度差值分别为 D 和 p 。若某一帧图像上某像素点的像素值为 $p_i(x, y)$,可进一步定义一个以该像素为中心的集合 R ,表示如下

$$R = [p_i(x, y) - p, p_i(x, y) + p], p < p_i(x, y). \quad (2)$$

在白光干涉图像中,前景表示为干涉条纹,背景为待测表面。若 R 与 $M(x, y)$ 的交集元素的数量大于前景判断阈值 D ,则判断该点与周围的像素点有近似的空间分布,该点为背景,反之则为前景,表示如下

$$\begin{cases} M(x, y) \cap R > D, \text{ background} \\ M(x, y) \cap R \leq D, \text{ foreground} \end{cases} \quad (3)$$

设 K 为时间抽样因子,若某点被判断为背景,则有 $1/K$ 的概率去更新该点的背景点集,也有 $1/K$ 的概率去更新相邻点的背景点集,这种方式能够有效降低杂散光及 CCD 噪声的干扰。

ViBe 算法对干涉图像的提取结果如图 5 所示,图 5(a)为待处理的图像,图 5(b)为将 ViBe 算法分割后所得背景及前景图像进行二值化处理后的结果。从图 5 中可以看出,ViBe 算法成功提取了绝大部分干涉图像,能够满足后续干涉信号处理算法的需要。

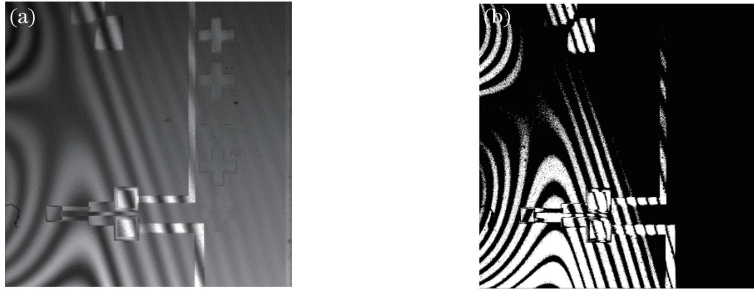


图 5 (a)待处理的图像;(b)对图 5(a)进行 ViBe 提取和二值化处理后的结果

Fig. 5 (a) Image to be processed; (b) result of Fig. 5 (a) treated by ViBe extraction and binaryzation

4.3 空间扫描范围的划定

在获取最佳干涉位置的二值化图像后,根据图像中是否存在灰度值为 255 的像素点判断图像中是否存在干涉条纹。若存在,则驱动压电陶瓷移相器分别向上和向下运动直到图中完全不存在灰度值为 255 的点为止,记录相应的压电陶瓷空间位置,即为扫描上限位置和扫描下限位置,两者之差就是空间扫描范围,上述过程如图 6 所示。

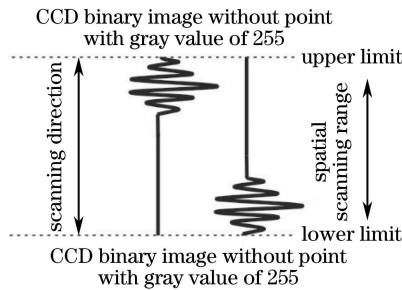


图 6 空间扫描范围的确定

Fig. 6 Determination of spatial scanning range

5 实验结果与分析

使用 Michelson 型干涉物镜(放大倍率为 5)对图 3(a)中所示的十字结构进行测试,白光干涉信号处理算法及空间扫描范围自适应划定方法均通过软件 Qt Creator IDE 配合开源计算机视觉库 OpenCV2.4.9 实现。测量过程中所取参数如下:步进电机运动速度 $2 \mu\text{m}/\text{pulse}$,前景判断阈值 $D=2$,像素灰度差 $p=20$,时间抽样因子 $K=16$ 。

调整系统获取清晰图像后选定待测区域,然后开始空间扫描范围自适应规划过程。首先定位待测区域中的最佳干涉位置,该过程由步进电机驱动干涉物镜,其间步进电机共运动 $32 \mu\text{m}$,上述过程的耗时如表 3 所示。

表 3 最佳干涉位置辨识的时间消耗

Table 3 Consumption time for identification of optimal interference position

Driving time of stepping motor /ms	10755
Collection time of image /ms	270
Processing time of image /ms	200
Total time /ms	11225

定位最佳干涉位置后,随即开始提取干涉条纹,该过程通过压电陶瓷移相器驱动干涉物镜实现。扫描上限和扫描下限所对应的 CCD 图像分别如图 7 和图 8 所示,图中白色矩形标记了待测区域。如图 7 所示待测区域中不存在干涉条纹。如图 8 所示,干涉条纹刚刚退出 CCD 视场。十字结构的测量结果如图 9 所示,其中图 9(a)为三维重构结果,图 9(b)为图 9(a)中红色线段标明区域的结构轮廓图。

应用提出的方法对中国电子科技集团公司第十三研究所提供的 $10 \mu\text{m}$ 标准台阶进行了测量,测量结果如图 10 所示,其中图 10(a)为台阶三维测量结果图,图 10(b)为图 10(a)中红线处结构轮廓图,该结果进一步证明了本方法的适用性。



图 7 扫描上限的确定。(a)扫描上限处的 CCD 图像;(b) ViBe 算法分割并二值化处理后的扫描上限处图像
 Fig. 7 Determination of scanning upper limit. (a) CCD image at scanning upper limit position;
 (b) image at scanning upper limit position after ViBe extraction and binaryzation treatment



图 8 扫描下限的确定。(a)扫描下限处的 CCD 图像;(b) ViBe 算法分割并二值化处理后的扫描下限处图像
 Fig. 8 Determination of scanning lower limit. (a) CCD image at scanning lower limit position;
 (b) image at scanning lower limit position after ViBe extraction and binaryzation treatment

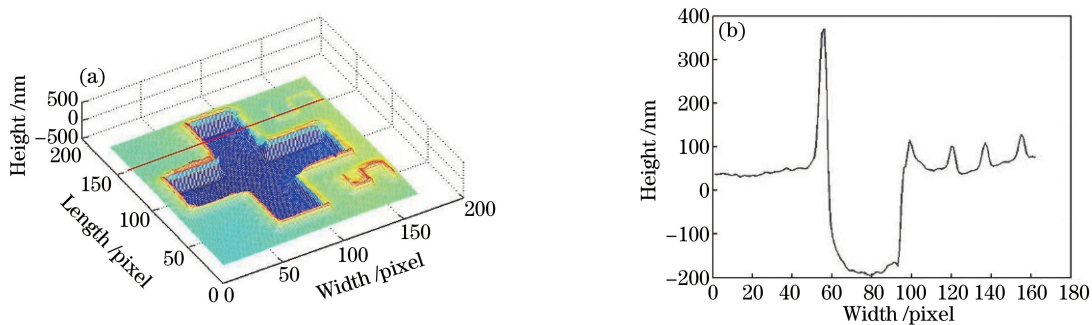


图 9 十字结构的测量结果。(a)三维测量结果;(b)红线处轮廓

Fig. 9 Measurement results of cross structure. (a) Three-dimensional measurement result; (b) profile at red line position

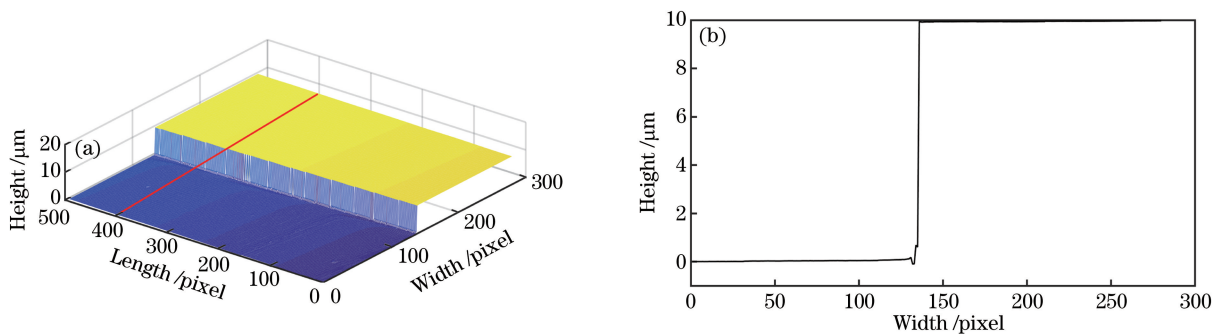


图 10 10 μm 台阶的测量结果。(a)三维测量结果;(b)红线处轮廓

Fig. 10 Measurement results at 10 μm step. (a) Three-dimensional measurement result; (b) profile at red line position

6 结 论

提出了一种白光干涉轮廓仪空间扫描范围自适应规划方法,构建了测量系统。针对选定的待测表面,首

先由步进电机驱动系统寻找最佳干涉位置;在此基础上,通过 ViBe 算法对白光干涉条纹进行提取,并以获得的干涉条纹二值化图像为依据驱动压电陶瓷移相器,实现了空间扫描范围的自动划分。实验结果表明,该方法可成功识别出待测表面的扫描上下限位置,有效提高了测试系统的效率与自动化水平。

参 考 文 献

- [1] Wu J J, Lei L H, Chen X, *et al.* A three-dimensional microdisplacement sensing system based on MEMS bulk-silicon technology[J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 20533-20542.
- [2] Wu Dongjiang, Zhou Siyu, Ma Guangyi, *et al.* Experiment of quartz glass flute precise thinning by femtosecond laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303009.
吴东江, 周思雨, 马广义, 等. 飞秒激光精密减薄石英玻璃凹槽实验[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303009.
- [3] Wang Dawei, Gao Xifeng. Study on Kerf roughness differences between line and arc analysis and elimination of laser precision cutting[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303005.
王大伟, 高席丰. 激光精密切割圆弧和直线粗糙度差异分析与消除[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303005.
- [4] Hu Dejin. Precision grinding and adaptive control method for hard and brittle aspheric optical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0722004.
胡德金. 硬脆非球面光学镜精密磨削与自适应控制方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0722004.
- [5] Groot P D, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(2): 389-401.
- [6] Sandoz P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(14): 1065-1067.
- [7] Li M, Quan C, Tay C J. Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(7): 920-929.
- [8] Nihues J, Lehmann P, Bobey K. Dual-wavelength vertical scanning low-coherence interferometric microscope[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7141-7148.
- [9] Viotti M R, Albertazzi A, Fantin A V, *et al.* Comparison between a white-light interferometer and a tactile formtester for the measurement of long inner cylindrical surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(5): 396-403.
- [10] Debnath S K, Kothiyal M P, Kim S W. Evaluation of spectral phase in spectrally resolved white-light interferometry: Comparative study of single-frame techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11): 1125-1130.
- [11] Munteanu F. Self-calibrating lateral scanning white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(12): 2371-2375.
- [12] Zou Wendong, Huang Changhui, Zheng Qiang, *et al.* Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1612-1619.
邹文栋, 黄长辉, 郑 瑜, 等. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(7): 1612-1619.
- [13] Pacholik A, Mueller M, Fengler W, *et al.* GPU vs FPGA: Example application on white light interferometry[C]. 2011 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, 2011: 481-486.
- [14] Schneider M, Fey D, Kapusi D, *et al.* Performance comparison of designated preprocessing white light interferometry algorithms on emerging multi- and many-core architectures[J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 4: 2037-2046.
- [15] Heikkinen V, Hanhijärvi K, Aaltonen J, *et al.* Hybrid light source for scanning white light interferometry-based MEMS quality control[C]. *SPIE*, 2011, 8082: 80822O.
- [16] Chong W K, Li X, Soh Y C. Spectral effects of dual wavelength low coherence light source in white light interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(6): 651-655.
- [17] Dong J T, Lu R S, Li Y, *et al.* Automated determination of best focus and minimization of optical path difference in Linnik white light interferometry[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(30): 5861-5871.
- [18] Guo Tong, Zhang Ying, Li Feng, *et al.* Measurement of large step structure by using white light speed-variable scanning interferometry[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(8): 1529-1534.
郭 彤, 章 英, 李 峰, 等. 采用变速白光扫描干涉术测量大尺度台阶结构[J]. *光电子激光*, 2012, 23(8): 1529-1534.

- [19] Ma Long, Zhang Hongyan, Niu Yifan, *et al.* Large range evaluation method based on white light scanning interferometry for aspheric optical elements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061207.
马 龙, 张鸿燕, 牛一凡, 等. 基于白光扫描干涉术的非球面光学元件大范围评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 061207.
- [20] Manske E, Jaeger G, Hausotte T, *et al.* Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 074001.
- [21] Shavrin I, Lipiäinen L, Kokkonen K, *et al.* Stroboscopic white-light interferometry of vibrating microstructures[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16901-16907.
- [22] Ma Long, Wang Dan, Zhang Hongyan, *et al.* A low overlap rate and large scope 3-D stitching method of microstructures[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(5): 910-918.
马 龙, 王 丹, 张鸿燕, 等. 微结构低重叠度大范围三维拼接方法[J]. *光电子激光*, 2015, 26(5): 910-918.
- [23] Ullmann V, Eman S, Manske E. White-light interferometers with polarizing optics for length measurements with an applicable zero-point detection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 084010.
- [24] Song Dingan, Li Xinyang, Peng Zhenming. Application of robust control to adaptive optics systems: A summary and review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 060001.
宋定安, 李新阳, 彭真明. 稳健控制在自适应光学系统中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 060001.
- [25] Barnich O, Droogenbroeck M V. VIBE: A powerful random technique to estimate the background in video sequences [C]. *IEEE International Conference on Acoustics*, 2009: 945-948.