

干涉条纹检测微动位移的图像处理方法

王成龙^{1,2}, 乔彦峰¹, 任德新³

(1 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3 二炮驻中电集团 型号办, 北京 100085)

摘要: 干涉测量方法目前已经在我国广泛应用, 测量精度也是不断提高, 而测量精度根据不同的方法而不同, 通过目测干涉条纹变化来检测位移的变化, 不仅使使用者劳动强度大, 而且因为不同的测量人员而得到的结果, 提出基于图像处理的干涉条纹检测微动位移的方法。根据试验结果, 检测精度达到 $\lambda/10$, 为精密测量位移提供方法参考。

关键词: 干涉条纹; 微动位移; 图像处理

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 2095-2163(2011)04-0011-03

A Method of Interference Fringe Image Processing for Checking Micro Displacement

WANG Chenglong^{1,2}, QIAO Yanfeng¹, REN Dexin³

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2 Graduate School of Chinese Academy Science, Beijing 100039, China;

3 Office in CETC of The Second Artillery Force of China, Beijing 100085, China)

Abstract: Interferometry is widely used in our country, and measurement accuracy is increasing. While different method would cause different accuracy, and based on manual watching interference to check displacement changing, it is hard to experimenters, and the accuracy result varies for different person. So the paper sets up a method to check micro displacement based on interference fringe image processing. From the experiment result, the checking accuracy is up to $\lambda/10$, the method can give reference to precise measurement.

Key words: Interference Fringe; Micro Displacement; Image Processing

0 引言

光学干涉检测在计量领域有很广的应用。干涉检测是以波长为基准对被检对象进行测量比较, 通过干涉条纹来反映被测对象的信息^[1]。按照传统的方法操作, 将干涉实验仪器调整好后, 只能到仪器的目镜中观察。而在每次测量时需要一百甚至几百条等倾干涉条纹进行记录, 不仅测量时间长, 同时还会对眼睛造成伤害。因此, 光学干涉检测技术中对条纹的自动记录和处理是非常重要的研究方向^[2]。

条纹的处理方法有多种, 检测的精度也随处理方法的不同而不同。条纹中心线法和全灰度法是典型的干涉条纹图分析方法^[3,4]。其中, 全灰度法主要包括相移法、傅里叶变换法等, 虽然这两种算法测量精度较高, 发展也已经比较成熟, 但主要弱点在于: 相移法需要三幅以上干涉条纹图, 傅里叶变换法受噪声的干扰比较大, 而且相位的精确展开对这两种算法一直是难以解决的困难^[5-7]。与全灰度法相比, 条纹中心线法作为一种直接测量的方法, 其对干涉条纹图的测量更快捷、有效。将条纹细化后再提取中心线, 可以显著有效地提高测量精度, 因此, 条纹细化的方法得到广泛地关注。本文提出基于计算机图像处理的干涉条纹中心线法检测微动位移, 条纹记录与处理通过此法即可直接实现。

1 条纹处理理论分析

1.1 条纹处理过程

收稿日期: 2011-11-09

基金项目: 国家 863 高新技术课题(2002AA880310)。

作者简介: 王成龙(1981-) 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 光电设备研制;
乔彦峰(1962-) 男, 吉林长春人, 本科, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 光电测控;
任德新(1969-) 男, 山东龙口人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 光学工程。

条纹处理过程见图 1。

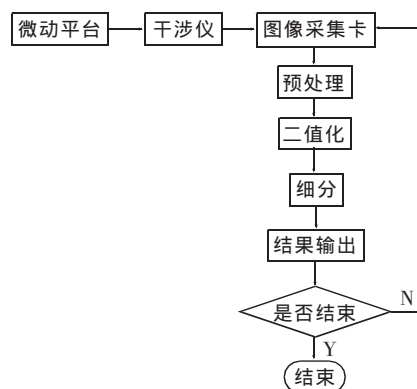


图 1 条纹处理过程

微动平台移动, 干涉仪利用光学入射光与出射光叠加形成干涉条纹, 条纹通过采集卡采集后, 输入处理单元, 在单元内对图像进行去纹降噪等预处理, 然后将处理完后的图像进行二值化和细分, 最后对细分的图像进行纵/横扫描, 根据多帧图像扫描交点进行平均, 得出干涉条纹变化结果。

1.2 条纹预处理

条纹的预处理包括去除背景和低频噪声。

1.2.1 背景去除

由于背景光经过干涉仪成像后, 在条纹像上形成散射

条纹影响^[8]。为了提高干涉条纹的对比度,消除背景光的影响,将采集到的干涉条纹与背景条纹进行图像相减运算。

设采集到的干涉条纹的灰度分布为 $f(i, j)$, 除去背景后的干涉条纹的灰度分布为 $g(i, j)$, 则:

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) - C(i, j), & f(i, j) - C(i, j) \geq 0 \\ 0, & f(i, j) - C(i, j) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $C(i, j)$ 为背景灰度; i, j 为图像象元坐标。

1.2.2 去除高频噪声

采用局部平均法进行高频滤波, 是最有效的除去高频噪声的方法。即图像中任何一点 $P(x, y)$ 的灰度值由该点和其周围各点的灰度进行平均计算得出, 平均计算的模板大小取 3×3 或 5×5 的模板。

干涉仪输出的原始条纹和经过条纹预处理的条纹图像分别如图 2 和图 3 所示。

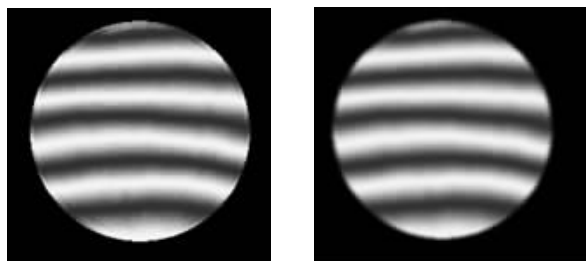


图 2 干涉仪输出原始条纹 图 3 干涉仪预处理后的条纹

1.3 条纹二值化

干涉条纹经过预处理后, 条纹的对比度依然不够高, 不能保证处理的准确, 需要对条纹进行二值化处理, 采用最大方差阈值法对干涉图像进行二值化。处理后的条纹见图 4。

1.4 条纹细化

细化算法对象元判读如图 5 所示。



图 4 二值化后的条纹分布

E7	E8	E1
E6	E	E2
E5	E4	E3

图 5 8-邻域标记

算法对二值化后的图像按像素分布纵横判断。假设对于任意一像素点 E , 按照条件对该像素周围 8 个像素点(见图 5)进行判读, 并根据像素灰度进行 1 或 0 标记。假设有条纹的象元标记 1, 没有条纹的像素标记 0。

设 K_E 为 E 点周围 8 个像素中标记 1 的像素数; f_E 为图 5 中各像素顺序标记的变化。满足下列(2)~(5)关系的, 将 E 点像素值置为 1。

$$2 \leq K_E \leq 6 \quad (2)$$

$$f_E = 1 \quad (3)$$

$$E2 * E4 * E6 = 0 \quad (4)$$

$$E4 * E6 * E8 = 0 \quad (5)$$

关系式(2)剔除像点没有条纹的象元和只有条纹的象元, 确保细化的条纹边缘连续; 关系式(3)确保条纹整体联系; 关系式(4)和(5)确保条纹像素相邻非角点像素也为条纹。逐个像素进行扫描判断, 直到整个像面象元全部标记为 1 或 0。

同样对整个条纹图像进行判读, 满足下列(6)~(9)关系的, 将 E 点像素值置为 1。

$$2 \leq K_E \leq 6 \quad (6)$$

$$f_E = 1 \quad (7)$$

$$E2 * E4 * E8 = 0 \quad (8)$$

$$E2 * E6 * E8 = 0 \quad (9)$$

细化处理后的条纹图如图 6 所示。

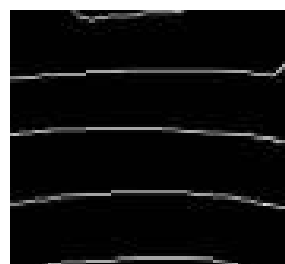


图 6 细化后的条纹图

1.5 计算条纹位移

假设条纹图像上某一列上具有条纹的象元记为 e_1, e_2, e_3, e_k , k 为该列条纹象元数。设 $k_{max} = N$, 则条纹图像总条纹象元的坐标为 $x_i (i=0, 1, 2, \dots, N)$, 再取第二帧条纹图像, 同样细分, 对于条纹象元则作为 x'_i , 由于条纹是连续变化, x_i 与 x'_i 是一一对应。

则条纹位移 d :

$$d = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M (x_i - x'_i) \quad (10)$$

2 测试结果与分析

测试系统如图 7 所示。

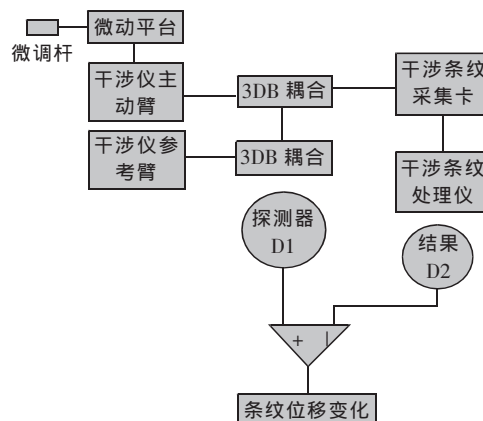


图 7 测试系统

平台微动位移引起干涉仪主动臂光程相位的变化, 经过与参考臂光路在 3DB 耦合器内干涉, 形成干涉条纹, 条

纹由采集卡进行采集,经过图像处理,得出条纹变化值。微动调节杆步长 $0.1\mu\text{m}$,干涉仪采用波长 $0.46\mu\text{m}$ 。通过检测条纹变化与调节杆对比,可以得出检测系统的精度。

变化的微动位移为:

$$d = D_2 - D_1 \quad (11)$$

测试精度为:

$$\delta = (D_0 - d) / 0.46 \quad (12)$$

检测结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

微动值 D_0	测量值 D_2	参考值 D_1	变化量 d	相对误差
$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\text{波长}$
0.1	0.091 14	0.003 652	0.087 488	0.027 804
0.2	0.186 22	0.007 545	0.178 675	0.047 389
0.3	0.269 98	0.001 465	0.268 515	0.069 967
0.4	0.361 83	0.002 457	0.359 373	0.090 282

从试验结果看,测量结果与微动机构实际位移比较接近,其误差主要来源于距离 Δd 的测量系统误差。随着位移增加,条纹变化数量的增加,条纹位移平均误差变小,系统相对误差变小。试验最大误差为 $1/10$ 个波长。

(上接第 10 页)

定义为沿着曲线弧长的曲率的二阶导数的积分。研究了最小变量 B-样条,因其和只用 B-样条函数定义的曲线优化问题是线性相关,对两者进行了比较。重点在于问题变量的属性,该问题是寻找一条限定于两个给定的多边形链之间的曲线,在障碍物的路径规划中得到运用。仿真实验证明,对于任何 B-样条函数,问题的凸性被转化为一个 B-样条定义的节点序列的缩放和平移,从而可以得到一个较为平滑的运动曲线。

使用封头,可以更好地计算避开障碍物的曲线,但却有一个缺点,就是需要一些空间来容纳障碍物之间的封头和曲线,因此,曲线很可能不是最光滑的。如何优化曲线使其变得更加光滑也是后续研究工作的方向,同时,随着节点数量增加,这种曲线变得更加光滑是可能的,但却不得不花更多的时间来计算曲线,所花的时间和提高的光滑度之间关系如何最优,也是后续研究的重点。

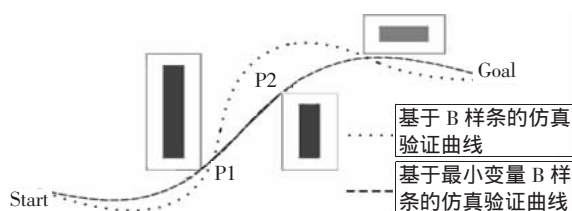


图 7 本算法和 B-样条算法实验仿真比较

参考文献:

[1] PAN R, WENG B. Recursive representation and application of

3 结束语

根据对干涉条纹的图像处理方法探讨,文中采用了基于图像处理的干涉条纹检测微动位移的方法。根据试验结果,检测精度达到 $\lambda/10$,为精密测量位移提供了方法参考。

参考文献:

- [1] 李锡善. 光学技术手册(下):干涉仪[M]. 第一版. 北京:机械工业出版社,1994:1007.
- [2] 田村秀行. 计算机图像处理技术[M]. 赫荣威,编译. 北京:北京师范大学出版社,1988.
- [3] 于起峰,陆宏伟,刘肖林. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [4] HAYAT L, SANDLER M B. Image compression algorithms for fast parallel thinning of binary images[J]. Electronics Letters, 1990, 26(14).
- [5] 崔凤奎,王晓强,张丰收. 二值图像细化算法的比较与改进[J]. 洛阳工学院学报,1997,18(4):48-51.
- [6] HILDITCH C J. Linear skeletons from square cupboards[J]. Machine Intelligence, 1969, 4:403-420.
- [7] 戴福隆,王朝阳. 条纹图像的数字化自动分析处理技术之一:条纹中心法[J]. 光子学报,1999,28(8):700-706.
- [8] 施启乐,王从军,黄树槐. 数学形态学图像细化算法 RE 中的应用研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(7):37-39.

transformation matrices of B-spline bases[J]. Computer-Aided Geometric Design, 2009, 26(1):82-93.

- [2] BERGLUND T, ERIKSON U, JONSSON H, et al. Automatic generation of smooth paths bounded by polygonal chains[C]// Proc. of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation (CIMCA), 2009: 528-535.
- [3] MORETON H. Minimum curvature variation curves, networks, and surfaces for fair free-form shape design[D]. California, USA: University of California at Berkeley, 2007:314-328.
- [4] DELINGETTE H, EBERT M H', IKERCHI K. Trajectory generation with curvature constraint based on energy minimization[J]. Osaka, Japan: Robotics Systems, 2006-11:229-233.
- [5] DIERCKX P. Curve and surface fitting with splines[J]. 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2008), 2008-08:265-269.
- [6] SARFRAZ M. Curves and surfaces for CAD using C2 rational cubic splines[J]. Khulna, Bangladesh: 2008 11th International Conference on Computer and Information Technology (I-CIT 2008), 2008-12:94-102.
- [7] LUTTERKORT D, PETERS J. Smooth paths in a polygonal channel[C]// Proceedings of the Symposium on Computational Geometry, 2007:316-321.
- [8] CONNORS J, ELKAIM G H. Manipulating b-spline based paths for obstacle avoidance in autonomous ground vehicles[C]// 2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2007), 2007-11:333-337.