

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0427-03

镜面热变形干涉图像处理的数学形态学新方法*

周次明 程祖海 张耀宁 侯冬兰

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 研究了激光腔镜热畸变的探测方法,并探讨了处理热畸变干涉图像的一种新方法。给出的实验结果证明该方法具有一定的实用价值。

关键词 激光腔镜, 干涉图像, 数学形态学, 图像处理

中图分类号 O438 文献标识码 A

Mathematical Morphology Method of Interference Patterns of Mirror Thermal Distortion

ZHOU Ci-ming CHENG Zu-hai ZHANG Yao-ning HOU Dong-lan

(State Key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A technique of measuring laser mirror thermal distortion and a method of mathematical morphology used to process interference patterns of thermal distortion are presented. The practicability of technique in this paper is proved by the results of experiments.

Key words laser mirror, interference fringe, mathematical morphology, image processing

1 引 言

在强激光系统中,激光腔镜的热畸变能引起激光光束质量下降,对这种畸变进行测量和分析的常用方法是光学干涉法。对采集到的光学干涉测量条纹图像,人们大量采用了图像处理技术分析处理^[1,2],并且积累了一些宝贵的经验,形成了以条纹中心法为主流的条纹处理方法^[3]。在这种方法中首先对条纹图像进行预处理,然后确定边界、细化条纹以检测条纹中心和修整条纹,最后根据处理结果进行分析计算,提取热畸变面形的波阵面。

本文将介绍激光腔镜热畸变探测方法和利用数学形态学对其干涉条纹细化处理的一种方法。

2 测试方法

实验测试系统简图如图 1 所示。其中 2 kW CO₂ 激光器为强激光源,He-Ne 器为泰曼干涉仪标准激光源。另外用于计算机图像处理的系统由

CCD 摄像机、监视器、计算机和打机构成。泰曼干涉仪及数据处理测试系统测量精度为 0.03 μm。

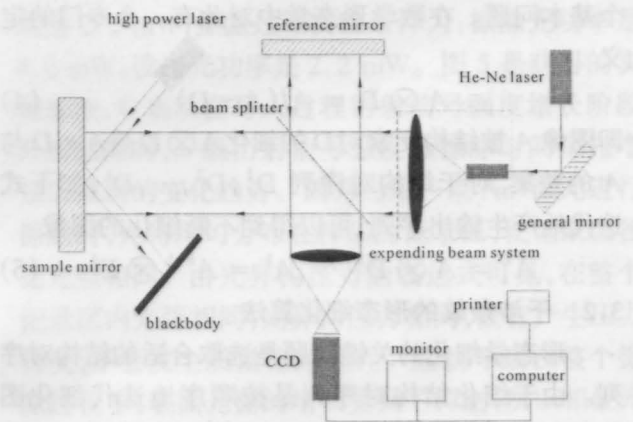


图 1 实验测试系统简图

Fig. 1 The schematic of measurement system

本测试系统中,用被测样品镜在高功率激光的照射下发生畸变来模拟激光腔镜在激光腔内发生热畸变的情况。测试开始时,高功率激光照射被测样品镜,被测镜吸收部分光能,引起热畸变。此时被测镜发生畸变后的面形反射的测量光束和具有标准面形的参考镜反射的参考光束发生干涉,经 CCD 拍

* 国家自然科学基金(69878008)、教育部重点基金、国家 863 计划资助课题。

摄,干涉图像输入计算机,经过图像处理系统的处理,得到畸变的具体情况。

3 数学形态学算法分析

3.1 数学形态学基本概念^[4]

数学形态学是一种新兴的图像处理方法和理论,它建立在严密的数学理论基础上。它最基本的变换就是形态学腐蚀运算。设有三个集合 A, B 和 D, A 为输入图像, B 为结构元素, D 为结构元素对, 即 $D = (E, F)$, 其中 E 和 F 为两个结构基元。则 A 被 B 腐蚀的定义如下

$$A \cdot B = \{x: B + x \subset A\} \quad (1)$$

对此定义的形象化解释就是,将结构元素平移 x , 但 B 仍然包含在 A 中的所有点 x 组成的集合是 A 被 B 腐蚀的结果。基于此基本变换可以定义本文所涉及的形态变换。

定义:结构元素 B 对图像 A 的膨胀为

$$A \oplus B = [A^c - (-B)]^c \quad (2)$$

其中 A^c 表示 A 的补集, $-B$ 表示 B 相对原点旋转 180° 。

定义:结构元素对 D 对图像 A 的击中击不中变换为

$$A * D = (A - E) \cap (A^c - F) \quad (3)$$

寻找二值数字图像的细化结构是图像处理领域的一个基本问题。在数学形态学中对此有一个专门的定义

$$A \otimes D = A / (A * D) \quad (4)$$

即图像 A 被结构元素对 D 的细化 $A \otimes D$ 是 $A * D$ 与 A 的差集。对于结构对序列 D^1, D^2, \dots, D^k , 如下式迭代地产生输出序列,可以得到不断细化的图像

$$A^1 = A \otimes D^1, \dots, A^k = A^{k-1} \otimes D^k \quad (5)$$

3.2 干涉条纹的形态细化算法

形态学细化的关键问题是选取合适的结构对序列。由于细化结构对序列是按顺序地迭代细化图像,因此细化过程是有方向性的^[4]。为了对 8 个方向均匀细化,必须使用 8 个方向的结构对。但是在对图像进行形态学扫描时,也是按一定的顺序进行,比如从上到下,从左到右。如果在一次扫描时只使用一个方向,用其结果进行下一次扫描,这样与其紧邻的两个方向难免受到前一次处理的影响。因此在设计细化结构元素时,必须兼顾这一点。

文献[4]中的形态细化结构元如图 2 所示。图中黑点表示击中结构元素,白点表示击不中结构元

素。细化过程的数学模型为

$$\text{Thin}(A) = [(\dots(A \otimes L_1) \otimes L_2) \dots \otimes L_4) \otimes M_1) \otimes M_2) \dots \otimes M_4)]_x \quad (6)$$

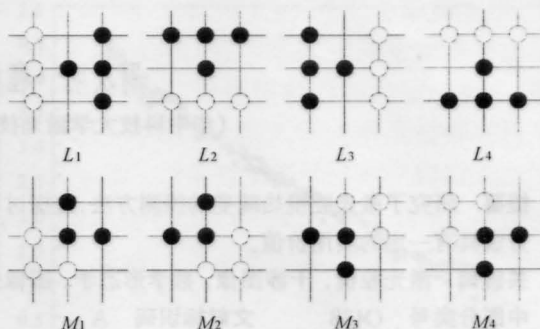


图 2 结构元素序列

Fig. 2 The series of structure elements

素。细化过程的数学模型为 $\text{Thin}(A)$ 表示对图像 A 的细化结果, x 为循环使用上述 8 个方向结构元素对,在细化完成时的迭代次数。如果将 L_1 当作对 0° 方向进行细化扫描, 则 L_2, L_3, L_4 分别为对 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 方向细化扫描,同时 M_1, M_2, M_3, M_4 分别对 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 方向进行细化扫描。(6)式表明,图像 A 在细化时首先是 0° 方向,然后用其结果再在 90° 方向细化,依此类推。在 M_4 细化完成后,再回到 L_1 , 循环迭代直到没有象素被细化为止。虽然 8 个结构元素对代表对 8 个方向的细化,但其细化过程只是简单地应用结构元素对各方向轮流细化,没有考虑到方向之间的联系。同时实践表明,细化完成后还存在一些上述结构元素对无法细化的非单象素宽线条。为了解决这些问题,可以在上述结构元素对的基础上增加如图 3 的一组结构元素对。

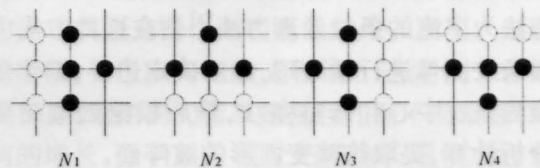


图 3 增加的一组结构元素对

Fig. 3 The additional structure elements

同时还可以将细化的数学模型修改为

$$\text{Thin}(A) = \{A / [(A * M_i) \cup (A * L_i) \cup (A * M_{i+3}) \cup (A * N_i)]\}_y \quad (7)$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4, i + 3$ 为模 4 的运算, y 为细化完成时迭代的次数。此模型为对图像 A 同时在 $315^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 方向细化,然后再在 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 和 $135^\circ, 180^\circ, 225^\circ$ 以及 $225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ 方向细化。增加的一个结构元素对 $N_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 强化了主要扫描方

向,即 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 。 N_i 与 L_i 和 M_i 配合,能解决非单像素宽细化线条的问题,提高了精度。

本算法的实现步骤如下:

1) 设定一个控制变量 $B = \text{FALSE}$;

2) $A = A / [(A * M_1) \cup (A * L_1) \cup (A * M_4) \cup (A * N_1)]$

即对 $315^\circ, 0^\circ$ 和 45° 方向细化。如果有像素被细化, $B = \text{TRUE}$;

3) $A = A / [(A * M_2) \cup (A * L_2) \cup (A * M_1) \cup (A * N_2)]$

即对 $135^\circ, 90^\circ$ 和 45° 方向细化。如果有像素被细化, $B = \text{TRUE}$;

4) $A = A / [(A * M_3) \cup (A * L_3) \cup (A * M_2) \cup (A * N_3)]$

即对 $225^\circ, 180^\circ$ 和 135° 方向细化。如果有像素被细化, $B = \text{TRUE}$;

5) $A = A / [(A * M_1) \cup (A * L_1) \cup (A * M_4) \cup (A * N_1)]$

即对 $315^\circ, 270^\circ$ 和 225° 方向细化。如果有像素被细化, $B = \text{TRUE}$;

6) 如果 $B = \text{TRUE}$, 回到第一步; 否则输出已细化图 A , 结束算法。

对于上述修改后的形态学细化方法, 虽然增加了一组结构元素对参加细化, 使细化的结构元素对达到了12个, 但是因为对细化的数学模型修改为在

同一轮迭代中有四个结构元素对同时参加运算, 使同一个像素同时用4个标准判断是否被删除, 提高了判断速度; 另外, 由于细化算法中只有4步为细化迭代步骤, 因此整个迭代次数 y 是4的倍数, 而普通方法的8个结构元素对分别参加迭代, 故总细化次数 x 是8的倍数, 大于 y 的几率很大。因此本文的方法能提高细化速度。

4 实验与结论

为了验证本文的测量方法和上述算法, 用图1所示装置实测了一幅干涉图(图像大小为 298×332)如图4(a)所示, 并用VC将文献[4]的算法和本文的算法进行了对比实验, 结果如图4(b)和(c)。

从图4(b)和(c)可以看出, 图(b)中还存在几处没有细化完成, 即细化线不全是单像素宽, 这样给线条的描述带来了困难, 而图(c)解决了这个问题, 使线条更加整齐匀称, 便于对条纹进行更准确的定位, 提高了条纹判读精度; 另外, 由于干涉图采集过程中噪声的影响, 条纹图像二值化后条纹不光滑, 从而造成细化线条有很多毛刺, 如图(b)和(c)中的毛刺, 但是图(c)的毛刺, 尤其是在其细化线条起始点处, 明显少于图(b), 有利于进一步对细化线条短枝的修剪和删除; 再加上形态学算法便于用硬件实现, 因此本文的数学形态学新算法在干涉条纹的处理中有较大的实用价值。

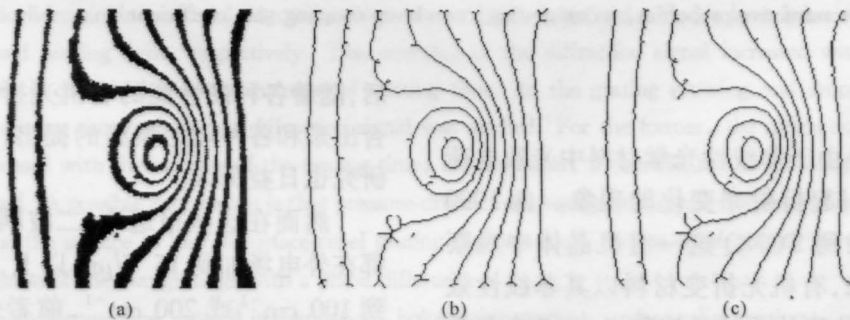


图4 实验结果。(a) 测试原图; (b) 文献[4]算法细化结果; (c) 本文方法细化结果

Fig. 4 The results of experiment. (a) The measurement image; (b) The thinning result of method in Ref. [4]; (c) The thinning result of modified method

参 考 文 献

- 1 Toyohiko Yatagai. Automated fringe analysis techniques in Japan. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1991, 15:79~91
- 2 Ramesh K., Ganesan V. R., Mullick S. K.. Digital image processing of photoelastic fringes—A new approach. *Exp. Tech.*, 1991, 15(5):41~46
- 3 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. *光子学报*, 1999, 28(8):700~705
- 4 崔屹. 图像处理与分析. 北京: 科学出版社, 2000