

用数字散斑方法测量物体运动轨迹*

高志 王仕康 彭翔 朱绍明** 刘昌文 刘杰

(天津大学热能研究所, 天津 300072)

提要 提出了利用多曝光数字散斑技术取代干板照相技术记录物体运动轨迹的研究方法, 根据杨氏条纹模型详细分析了该方法的基本原理, 给出了物体的面内运动和小角度转动两种运动轨迹的测量结果, 对影响实验结果的因素进行了讨论。

关键词 数字散斑, 多曝光照相, 运动轨迹

1 引言

多曝光照相技术记录下的物体运动轨迹中包含有不同时刻物体的位置、速度、加速度等信息, 对于研究实际物体的运动特性有着重要意义。洛曼(Lohmann)等学者曾提出过一种利用多曝光散斑照相技术记录物体运动轨迹的方法^[1]。他们的基本思想是认为多曝光散斑图为同一散斑图平移后叠加在一起的结果, 是单散斑场与运动轨迹的卷积, 可以通过两次光学傅里叶变换从中提取出物体运动轨迹的信息。洛曼的方法存在的问题是多曝光散斑图的获取及两次光学傅里叶变换都是通过干板照相实现的, 该过程操作复杂、周期长、引入误差大且不利于后期信息处理。

本文将报道基于洛曼思想利用数字散斑技术^[2,3]对多曝光运动轨迹测量技术进行的研究。首先用杨氏条纹概念分析测量原理, 然后给出两个数字散斑轨迹测量结果——物体的面内运动和物体的微角度转动。并根据理论和实验分析影响测量结果的因素。

2 原理

2.1 双曝光数字散斑

多曝光理论是以双曝光理论为基础的, 首先研究双曝光。考虑散斑场横向移动, 设静态散斑场光强分布为 $I_0(r)$, r 为接收面(摄像机靶面)内位置矢量。实际上, 在数字散斑中, 散斑图及其傅里叶变换结果都是存放在图像板帧存储器中图像存储空间 (m, n) 中, 由于经 CCD 采样后, 离散的值与 (m, n) 有一一对应关系, 为了突出物理图像, 下文中无论是图像还是图像的傅里叶变换, 其空间坐标均用一矢量表示。认为物体运动时, 散斑场分布不变仅作整体移动, 将两

* 国家自然科学基金委及天津市科委资助项目。

** 天津大学精仪系 94 毕业生。

收稿日期: 1994年11月11日; 收到修改稿日期: 1995年1月26日

次曝光接收到的散斑场分别表示为 $I_0(r - r_1)$ 、 $I_0(r - r_2)$, r_1 、 r_2 表示对应于两次曝光时刻物体所处的位置。叠加散斑场可表示为

$$I_s(r) = I_0(r - r_1) + I_0(r - r_2) \quad (1)$$

由卷积及 δ 函数的性质, 可将(1)式改写为

$$I_s(r) = I_0(r) * [\delta(r - r_1) + \delta(r - r_2)] \quad (2)$$

对(2)式进行数字(离散)傅里叶变换有

$$F_s(u) = F_0(u) \cdot [\exp(-j2\pi u \cdot r_1/N) + \exp(-j2\pi u \cdot r_2/N)] \quad (3)$$

$F_s(u)$ 、 $F_0(u)$ 分别为 $I_s(r)$ 、 $I_0(r)$ 的数字傅里叶变换。为书写方便, 略去了变换式前的系数, 其中 N 为将二维散斑图像抽样为离散点阵的行(列)数, 实际上为图像板帧寄存器的存储单元的行(列)数。对(3)式两边取模平方得

$$|F_s(u)|^2 = |F_0(u)|^2 \cdot [2 + 2\cos(a_1 - a_2)] \quad (4)$$

其中

$$a_1 = 2\pi u \cdot r_1/N, \quad a_2 = 2\pi u \cdot r_2/N$$

(4)式右边余弦项为条纹项, 一般称为杨氏条纹。 $|F_0(u)|^2$ 称作衍射晕^[4]。由散斑场的统计特性^[4,5]知, 对于大多数物体来说在滤除高频分量后, $|F_0(u)|^2$ 一般比条纹的变化要慢, 因此(4)式显示的是一幅散斑条纹图。条纹的取向垂直于 $r_1 - r_2$, 条纹间隔为 $N/(r_1 - r_2)$ 。在轨迹测量技术中感兴趣的是对(4)式再进行一次傅里叶变换。若将 $|F(u)|^2$ 对应的傅里叶变换式记为 $FF(\gamma)$, 在忽略 $|F_0(u)|^2$ 项时将有

$$|FF_s(\gamma)| \approx 2\delta(\gamma) + \delta(\gamma + r_1 - r_2) + \delta(\gamma + r_2 - r_1) \quad (5)$$

为书写方便记 $\gamma_{12} = r_1 - r_2$, 则(5)式可记为

$$|FF_s(\gamma)| \approx 2\delta(\gamma) + \delta(\gamma \pm \gamma_{12})$$

除了中心亮点 $\delta(\gamma)$ 以外, $\delta(\gamma \pm \gamma_{12})$ 记录了物体的位移矢量 $\gamma_{12} = r_1 - r_2$ 。因此, 对双曝光散斑图作两次傅里叶变换将得到物体的位移矢量, 但该矢量的指向信息已丢失了。

2.2 多曝光数字散斑

用同样方法分析多曝光散斑图, 对应(2)式有

$$I_s(r) = I_0(r) * \sum_{i=1}^n \delta(r - r_i) \quad (6)$$

其中 r_i 为曝光时刻物体所处的位置矢量, n 为曝光次数。对(6)式进行傅里叶变换, 并取模平方得

$$|F_s(u)|^2 = |F_0(u)|^2 \left[n + \sum_{i=1, k=1}^n \cos(a_i - a_k) \right] \quad (i \neq k) \quad (7)$$

其中

$$a_i = 2\pi u \cdot r_i/N, \quad a_k = 2\pi u \cdot r_k/N$$

(7)式表明多曝光散斑图的傅氏变换谱图上叠加着多组杨氏条纹。任意两次曝光时刻(不一定是相继两次)物体所处两位置之间的位移矢量都以条纹形式记录在谱图上。对(7)式再进行一次傅氏变换可将上述位移矢量表示出来

$$|FF_s(\gamma)| \approx n\delta(\gamma) + \sum_{i=1, k=1}^n [\delta(\gamma - \gamma_{ik})] \quad (i \neq k) \quad (8)$$

其中

$$\gamma_{ik} = (\gamma_i - \gamma_k) \quad (i \neq k)$$

(8) 式描述的是由一亮点群构成的二次傅氏变换谱图。除了中心亮斑外,可认为亮点群由 n 组亮点构成,其中第 i 组中的亮点 k 表示的是物体运动过程中第 k 次曝光位置相对于第 i 次曝光位置的位移矢量。由位移矢量的性质知,这组亮点即构成了物体运动轨迹,但从 n 组亮点相互交错着构成的亮点群(8)中已无法分离出单一运动轨迹信息。

2.3 参考散斑图

为了提取出单一的轨迹信息,可选取一特殊的曝光位置(参考位置) r_r ,使得其它曝光位置(轨迹)相对于该参考位置的位移矢量均大于轨迹点之间位移矢量最大值的 $3/2$ 倍,这样以该位置为参考显示物体运动轨迹的一组亮点将与其它亮点组在谱图上错开,显示清晰的运动轨迹。此时,(8)式可改写成

$$|FF_s(\gamma)| \approx (n+1)\delta(\gamma) + \sum_{i=1, k=1}^n \delta(\gamma - \gamma_{ik}) + \sum_{i=1}^n \delta(\gamma \pm \gamma_{ir}) \quad (i \neq k) \quad (9)$$

从(9)式看出,当 $|\gamma_{ir}| > \frac{3}{2} \max |\gamma_{ik}|$ 时,由 $\sum_{i=1}^n \delta(\gamma - \gamma_{ir})$ 决定的一组运动轨迹将与轨迹叠加图 $\sum_{i=1, k=1}^n \delta(\gamma - \gamma_{ik})$ 区分开。考虑到参考图的作用,可采用傅里叶全息照相技术中的作法,通过加大参考图的亮度来加强轨迹图的对对比度。参考图与多曝光散斑图进行数字叠加前给参考图乘一系数便能够实现上述作法,这在干板照相技术中是无法实现的,此处体现了数字散斑的灵活性。

实验过程中,可在物体运动前或后将物体向偏离运动轨迹的方向横向移开一段距离,并使该距离大于物体运动范围最大尺度的 $3/2$ 倍,此时采集的散斑图便可作为轨迹测量的参考图,将它与物体运动过程中采集的多曝光散斑图叠加在一起进行两次数字傅里叶变换便能得到单一的运动轨迹图。

在上述推导过程中第一次傅里叶变换取的是功率谱,这样得到的谱图的条纹调制度好;第二次取的是振幅谱(功率谱的平方根),这样得到的轨迹图的背景噪声小。实验过程中,上述结论得到了验证。

2.4 单散斑场

在(5)式和(8)式中都忽略了单散斑场的变换谱图。实际上单散斑场的变换谱图有着重要的意义。前面已经给出结论,一次变换后的条纹图为单散斑场功率谱的余弦调制图。当考虑单散斑场的影响时,相应于(8)式有

$$|FF_s(\gamma)| = |FF_o(\gamma)| * [n\delta(\gamma) + \sum_{i=1, k=1}^n \delta(\gamma - \gamma_{ik})] \quad (i \neq k) \quad (10)$$

其中 $|FF_o(\gamma)|$ 为单散斑场 $I_0(r)$ 的两次傅里叶变换,即 $I_0(r)$ 的自相关。由文献[5]的结论知, $|FF_o(\gamma)|$ 为散斑颗粒横向尺寸的估计值。这样一个函数与由 δ 函数构成的轨迹函数进行卷积仍将显示出轨迹图案,其中表示物体位置的点的大小即为单个散斑颗粒的大小。由此说明,两次变换后得到的轨迹图为单散斑场自相关的 δ 函数调制图。

在两次变换过程中,散斑场及其傅里叶变换一直是信息的载体。

3 实验及结果分析

本文中研究的是成像散斑。对于成像散斑有下述结论^[6]:物体的面内位移对应着像面散斑的横向移动;(平行光照明下)物体的微角度转动对应着焦面散斑的横向移动。因此,按上两条

件排布光路,可根据前述理论通过测量像面及焦面散斑的横向移动记录物体的面内运动及微小角度转动的轨迹,实验系统如图 1 所示。

图 1 中的待测物体为固定多维调整架上的毛玻璃。波长为 632.8 nm 的 He-Ne 输出光经扩束、针孔滤波及准直后以近 45°角斜入射到毛玻璃表面,照明区域的直径为 1.5 cm,摄取的图像为毛玻璃前向散射光形成的散斑场。图像接收系统由 CCD 摄像机、成像镜头 ($f = 50$ cm, $N. A. = 1/11$)、图像板 (DT-2803)、386 微机及监视器组成。多曝光散斑图是通过移动毛玻璃,在不同的位置采集相应的散斑图,在图像板中进行数字叠加后得到的。在采集多曝光散斑图前,先将毛玻璃按前述原则移开一适当距离,采集一张参考图。由理论分析知,在将参考图叠加到多曝光散斑图前应先乘一系数以提高轨迹图的对比度。由于参考图本身也是散斑图,既有分离轨迹信息的功能,也有引入散斑噪声的作用,所以选取放大倍数时要折衷考虑两者的影响,实验表明乘以系数 2 可达到最佳效果。

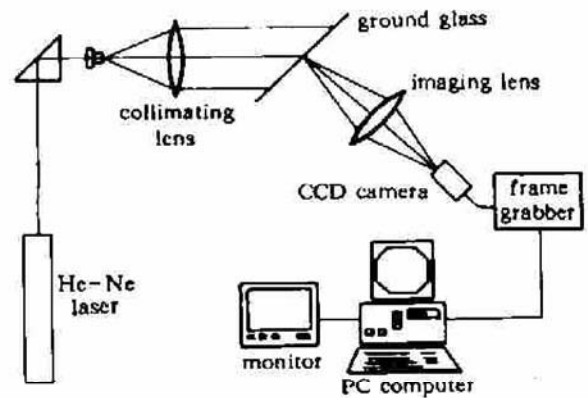


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

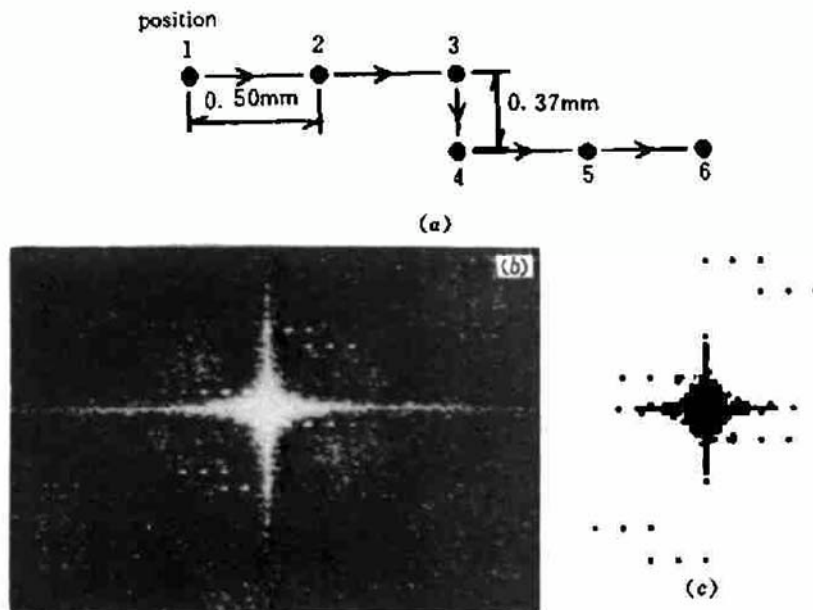


Fig. 2 Measurement results of the lateral motion path



Fig. 3 Measurement result of the tilt path

图 2(b) 为从监视器上直接拍摄的横向轨迹测量结果。毛玻璃的运动轨迹为图 2(a) 所示的阶梯形,其间曝光 6 次(叠加 6 幅单散斑图),水平步长为 0.5 mm,垂直步长为 0.37 mm。图 2(c) 为结果图 2(a) 经二值化处理后打印输出的同一横向轨迹图。图中心显示的是与散斑噪声混在一起的轨迹自相关;图右上部分为由参考图分离出的

运动轨迹图,左下部分为轨迹图的共轭图。图3为打印输出的二值化转角测量结果,轨迹图叠加了3幅散斑突,每步转角约为 0.5° 。

4 测量精度分析

由轨迹测量原理知,测量的分辨率及范围与双曝光位移测量的分辨率及范围为同一数量级。测量的最小位移应保证在散斑条纹图上能读取一对条纹;测量的最大位移应保证条纹间距大于5个像素间隔^[6]。设一个存贮单元对应的物面尺寸为 a (其中包含成像系统的放大倍数及摄像机靶面像素面积与图像板存贮单元个数的对应关系),由条纹间隔公式 $N/(r_1 - r_2)$ 知,可测量的最小位移为 a ,最大位移为 $N \cdot a/5$ 。实验中测得 $a = 90 \mu\text{m}$,所用图像板决定 $N = 256$ 。因此,在实验所取光路参数下,最小位移为 $90 \mu\text{m}$,最大位移为 4.6 mm 。要想提高分辨率、扩大测量范围应选取存贮空间大的图像板。

在数字散斑轨迹测量技术中影响测量精度的主要因素为数字图像技术所引起的灰度级的量化误差和空间坐标的抽样误差。由前原理分析知,灰度级对测量精度无影响,因为重要的是函数的峰值(二值函数);但当图像灰度级低时,单散斑图携带的信息在数字化时丢失得多,随着曝光次数的增加,由单散斑图交错着叠加在一起的多曝光散斑图将趋于均匀场,无法从中提取轨迹信息。文中所用图像板的灰度级为64,实验中发现,用其能得到6次曝光轨迹图。曝光次数再增加,轨迹图的清晰度将下降。目前通用图像板中A/D、D/A转换器均为12倍,对应的灰度级至少为1024,采用这样的图像板可大大增加曝光次数,扩大轨迹的测量范围。

在散斑图的摄取及两次傅里叶变换过程中都存在着空间坐标的抽样误差。当满足采样定理时,散斑图的摄取及变换出条纹图的过程都不会对测量精度产生重要影响。在变换出轨迹图时,将引起对物体两位置之间距离测量值的测量误差,显然该误差值即为一个存贮单元对应的物面尺寸 a 。 a 值的大小由CCD靶面像素数、采样频率、图像板帧存体的存贮单元数及成像系统的放大倍数决定。

5 结 论

本文利用数字散斑技术实现了物体运动轨迹的测量。在数字散斑技术中,图像一旦采集完毕,一切处理过程都将在计算机内完成,避免了传统干板成像方法需多次重复的曝光量调节、冲洗底片等复杂过程,操作简单,易于实用化。由于利用目前通用微机配以附带加速卡的商品图像板对一幅散斑图进行二维傅里叶变换耗时仅为毫秒量级,实际的测量过程可达到准实时化程度。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann, G. P. Weigelt. The measurement of motion trajectories by speckle photography. *Opt. Commun.*, 1975, 14(2): 252
- 2 D. J. Chen, F. P. Chiang. Computer speckle interferometry. Proc. of Inter. Conf. on Hologram Interferometry and Speckle Metrology (Society for Experimental Mechanics, Baltimore, Md.) 1990. 49
- 3 胡逸群,谷士文,费耀平等. 用数字图像技术直接对双曝光散斑图像逐点分析. *光学学报*, 1993, 13(8): 734
- 4 R. Megnart. Diffraction halo in speckle photography. *Appl. Opt.*, 1984, 23(14): 2235

- 5 J. W. Goodman. Statistical properties of laser speckle patterns, in *Laser speckle and related phenomena*, Ed. by J. C. Dainty, 1984, Springer-Verlag 2nd. ed. 9~74
- 6 R. Jones, E. Wykes. *Holographic and speckle interferometry*. 1989 Cambridge University Press, 2nd. ed. Ch. 3

A Digital Speckle Method for the Display of Motion Paths

Gao Zhi Wang Shikang Peng Xiang Chen Tong Liu Changwen Liu Jie

(*Laser Diagnostic Lab. Thermal Science Institute Tianjin University, Tianjin 300072*)

Abstract A digital speckle multi-exposure photographic technique has been proposed instead of the traditional technique of using photographic plates for the display of motion paths. The principle of the proposed method has been described in detail in terms of the Young's fringe model. Two experimental results for the lateral motion and the tilt of the measured are been presented. The factors which affect the measuring results are analysed.

Key words digital speckle, multi-exposure photography, motion path