

文章编号: 1001-3806(2006)03-0258-04

动态过程中破裂表面的三维重建

肖焱山, 苏显渝*, 张启灿, 朱清溢
(四川大学 光电系, 成都 610064)

摘要: 在冲击、爆轰等动态过程的研究中, 被测三维表面将发生破裂及碎片飞散等过程, 为动态过程的三维重建带来困难。针对此问题提出了一种动态过程中破裂表面的三维重建方法, 这种方法以傅里叶变换轮廓术为基础, 利用条纹图中裂缝的信息, 生成一个三维二元控制模板, 在该模板的控制下进行三维相位展开。以玻璃破裂过程的三维重建实验为例, 处理结果证实了该方法的可行性。该方法可用于材料变形、爆轰过程、碰撞变形等相关领域的动态过程研究, 对于深入分析冲击与爆轰过程、材料变形与破坏机理、碎片飞散规律等具有重要意义。

关键词: 信息光学; 三维重建; 动态过程测量; 傅里叶变换轮廓术; 冲击和爆轰

中图分类号: O438 TN206 文献标识码: A

3-D surface shape restoration for the breaking surface of dynamic process

XIAO Yan-shan, SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, ZHU Qing-yi
(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract The breaking surface and dispersing fragments bring some difficulties to the surface restoration of dynamic process including impact or explosion process. Therefore, a novel method of 3-D restoration for the breaking surface of dynamic process based on FTP is proposed. 3-D binary masks are built with the information of the cracks of the deformed fringes images and the 3-D phase maps are unwrapped under the control of them. The experiment of the 3-D surface shape restoration of a breaking glass proved the feasibility of this method, and this method provides a new means for thoroughly analyzing the theory of dynamic process such as dispersing fragments, deformation of material explosion process and deformation in impact.

Key words information optics; 3-D restoration; dynamic process measurement; Fourier transform profilometry; impact and explosion

引 言

光学三维传感由于其具有非接触、高速、高精度, 易于实行自动化测量的优点, 已被广泛用于机器视觉、实物仿形、工业制造与检测、生物医学等领域。由 TAKEDA 等人^[1,2]提出的傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform profilometry, FTP) 是其中应用较为广泛的一种方法, 它因具有单帧获取、全场分析、高分辨率和易于处理动态过程等优点而受到人们的广泛关注^[3-5]。在冲击、爆轰等动态过程的研究中, 被测三维表面将发生破裂及碎片飞散等过程, 为动态过程的三维重建带来困难^[6]。作者提出了一种发生破裂的动态表面的三维重建方法, 以玻璃破裂过程的三维面形测量为例, 通过结构光照明和高帧频的 CCD 摄像机快速获取其

破裂过程中的一系列变形条纹图, 再经过傅里叶变换、频谱滤波、逆傅里叶变换、三维相位展开等处理^[4]后得到重建的一系列破裂过程中玻璃表面的三维面形, 再现玻璃破裂的过程。

1 理论基础

动态过程的 FTP 测量系统光路与常见的 FTP 光路图相似。其投影光路如图 1 所示, $E_p'E_p$ 是投影系统的光轴, $E_c'E_c$ 为成像系统的光轴, 两光轴相交于参考平面 R 上的点 O , 光栅 G 的栅线垂直于 $E_p'E_cO$ 平

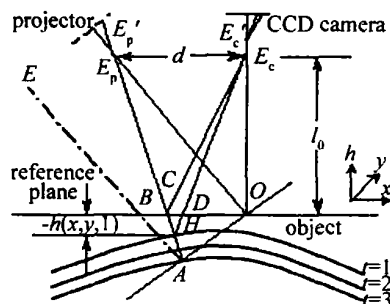


Fig 1 Light path of FTP

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10376018)

作者简介: 肖焱山 (1980), 男, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: xysa@email.scu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-17; 收到修改稿日期: 2005-08-16

面,成像系统一般采用 CCD 摄像机。其主要方法是:首先将一正弦(或罗奇)光栅投影到参考平面上,通过 CCD 记录其光强分布;然后再投影到物体表面,当物体处于动态变化过程中时,用 CCD 快速记录一系列的变形条纹图像。

参考平面上的光强分布为:

$$g_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)] \quad (1)$$

式中, $a(x, y)$ 表示背景光强, $b(x, y)$ 表示参考平面非均匀反射率, f_0 为光栅像的空间频率, $\varphi_0(x, y)$ 是参考平面上的相位分布。

通过 CCD 快速摄像所获取的变形条纹图的强度分布为:

$$g(x, y, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y, t)], t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

T 为整个动态过程的历经时间, $a(x, y, t)$ 是 t 时刻的背景分布, $b(x, y, t)$ 是 t 时刻物体表面非均匀的反射率, $\varphi(x, y, t)$ 是受物体高度调制的相位, 包含物体的高度信息。

对获得的各帧变形图进行傅里叶变换, 通过一个合适的带通滤波器分离出基频分量, 再对分离出的基频分量进行逆傅里叶变换, 可以得到:

$$\hat{g}(x, y, t) = \frac{b(x, y, t)}{2} \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi(x, y, t)]\} \quad (3)$$

对参考平面上的光强分布 (1) 式作类似的变换和滤波处理, 可得:

$$\hat{g}_0(x, y) = \frac{b(x, y)}{2} \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)]\} \quad (4)$$

由物体的高度所引起的相位变化 $\Delta\varphi(x, y, t)$ 为:

$$\Delta\varphi(x, y, t) = \varphi(x, y, t) - \varphi_0(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[\hat{g}(x, y, t) \hat{g}_0^*(x, y)]}{\text{Re}[\hat{g}(x, y, t) \hat{g}_0^*(x, y)]} \quad (5)$$

Im 和 Re 分别代表 $[\hat{g}(x, y, t) \hat{g}_0^*(x, y)]$ 的虚部和实部, “*” 表示共轭。

根据相位与高度的对应关系式, 可得:

$$h(x, y, t) = l_0 \Delta\varphi(x, y, t) / [\Delta\varphi(x, y, t) - 2\pi f_0 d] \approx -l_0 \Delta\varphi(x, y, t) / 2\pi f_0 d \quad (6)$$

利用上式就可以恢复出物体的三维面形分布。

2 三维相位场的展开

从上面的计算公式可以看出, 相位场的分布 $\Delta\varphi(x, y, t)$ 不仅与 x, y 有关, 并且与时间 t 有关, 是一个截断在反三角函数主值区间 $(-\pi, \pi)$ 内的三维相位场。为了获得连续的相位分布, 必须进行相位展开。三维相位场的展开不仅要在 x, y 二维面上进行, 而且

还应在 t 方向上进行展开, 以保证相邻时刻相位场的连续性^[4]。对于发生破裂的动态表面重建问题, 由于获取的变形条纹图像发生断裂, 因此条纹的跟踪产生困难。原理上, 由于裂缝两侧的条纹失去了相邻关系, 一个断裂二维相位场是无法正确展开的。但是, 在三维相位场中, 由于新增了需要展开的时间维数, 这给相位展开带来了新的展开方法和路径, 增加了相位不连续点的可展性和自由度。

在获得三维截断相位场后, 利用条纹图像的调制度生成三维二元可靠度模板, 可靠度模板与条纹图的大小相等, 用来标识相位值可靠与不可靠的像素点, 根据条纹图像的调制度设置阈值, 调制度高于阈值的像素点被认为是可靠点, 模板值设为 1, 调制度低于阈值的像素点被认为是不可靠点, 模板值设为 0。进行相位展开时, 用模板覆盖住相位值不可靠的点, 不让其参与相位展开, 这样展开时就不会发生错误传播的情况^[7, 8]。

在相位展开时采用三维快速菱形算法, 示意图如图 2 所示, 假定相位展开的起始点为点 1, 在计算机中

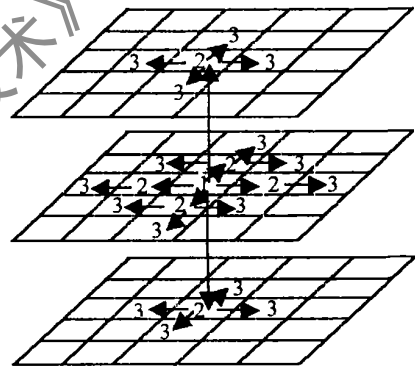


Fig 2 Sketch of 3-D phase unwrapping

建立一个队列, 依次压入与起始点 1 相邻的 6 个点 (见图中标注 2 的点), 从队列出口处开始相位展开, 在从队列出口处弹出像素点进行相位展开的同时压入与起始点 2 相邻的 18 个点 (图中标注 3 的点, 图中只画出了 16 个点)。以下依次类推, 直到全部像素点都压入队列, 随后队列中所有元素均全部弹出进行相位展开, 队列为空时则相位展开过程结束。进行相位展开时, 与可靠度模板相结合, 已展开点处模板值设为 1, 相位展开结束后, 再对不可靠点处进行处理, 这样就完成了整个截断三维相位场的展开工作。

3 实验结果

以玻璃破裂过程的三维面形测量为例, 进行破裂过程的三维重建。玻璃被竖直放置于投影光栅像的视场中央, 并用铁夹夹住玻璃的下端, 使其固定。调节玻璃的位置, 使玻璃能被均匀照明。玻璃表面喷上很薄的白漆, 以便将条纹图像投影在其表面。从后方用铁

锤敲击玻璃,同时使用高帧频的 CCD 进行摄像,拍摄玻璃的破裂过程,实验装置示意图如图 3 所示。所用

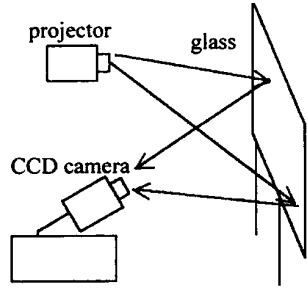


Fig 3 Sketch of experimental setup

摄像机是 SpeedCam Visario 高速 CCD 相机,镜头焦距为 82mm;采用的摄像机的拍摄频率为 4000frame/s 每帧图像的曝光时间为 0.25ms 投影系统出瞳到成像系统出瞳的距离是 300mm,投影系统出瞳到玻璃中心的距离是 540mm,投影器中正弦光栅的周期是 0.25mm。快速摄像时,采集到的数据暂存于 CCD 摄像机的缓存中,待采集完毕后再转存到计算机的硬盘。实验共采集到 350 帧动态图像。敲击玻璃后,玻璃不是立即破裂,而是先发生震动,然后破裂开来。前 33 帧图像是敲击之前的状态,第 34 帧到第 4 帧是已经

敲击但玻璃尚未破裂的状态,虽然此时玻璃未破裂,但发生了震动,条纹像也发生了形变。第 45 帧以后是玻璃破裂的过程,整个拍摄时间大约是 87.5ms

作者对其中的 38 帧连续图像(从第 32 帧到第 69 帧)进行了处理,包括玻璃从静止到震动到破裂的过程。将获取的图像剪裁成 385 像素 × 257 像素大小。

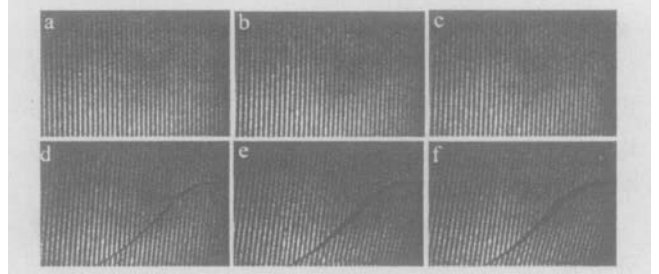


Fig 4 Six frames deformed fringes images of a breaking glass a—the 33rd frame b—the 43rd frame c—the 45th frame d—the 52nd frame e—the 60th frame f—the 69th frame

图 4 是其中的 6 帧变形条纹图,对应第 33、43、45、52、60、69 帧(分别对应开始拍摄后的第 8.25ms、10.75ms、11.25ms、13ms、15ms、17.25ms)。图 5 中分别绘出了与图 4 中 6 帧变形条纹图相对应的重建的三维面形网格图。并且选取了 6 个不同时刻来研究玻璃在破裂过

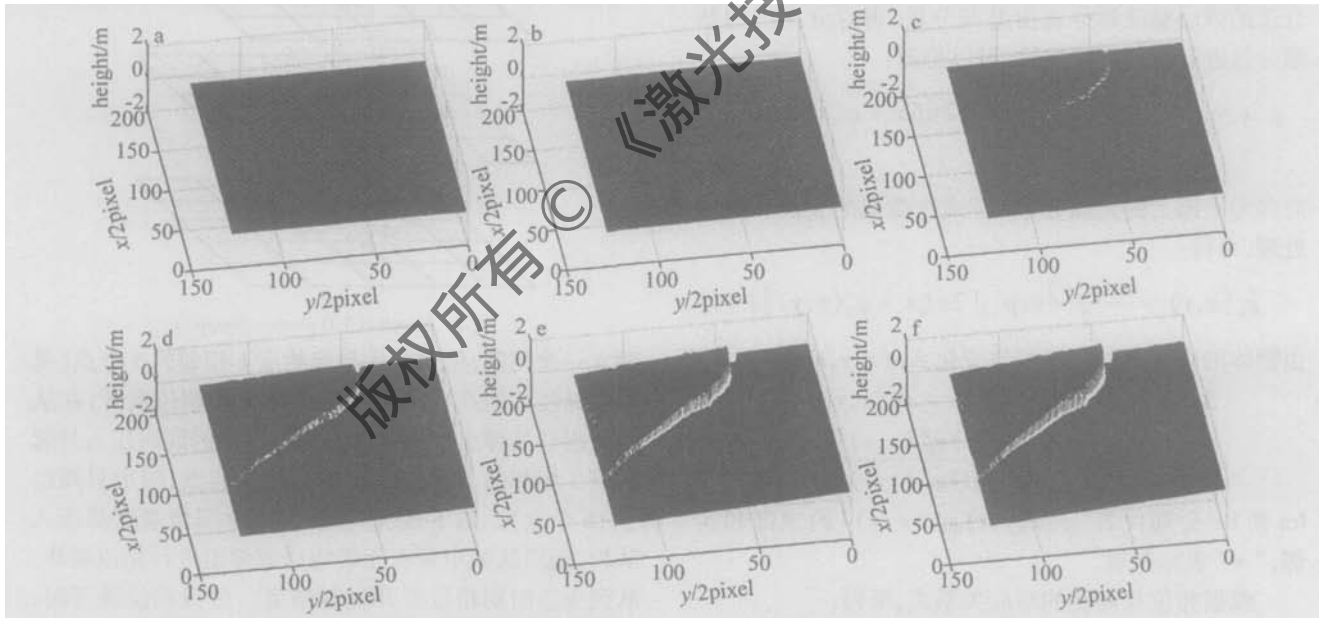


Fig 5 Six gridding figures of restored shape of a breaking glass

a—the 33rd frame b—the 43rd frame c—the 45th frame d—the 52nd frame e—the 60th frame f—the 69th frame

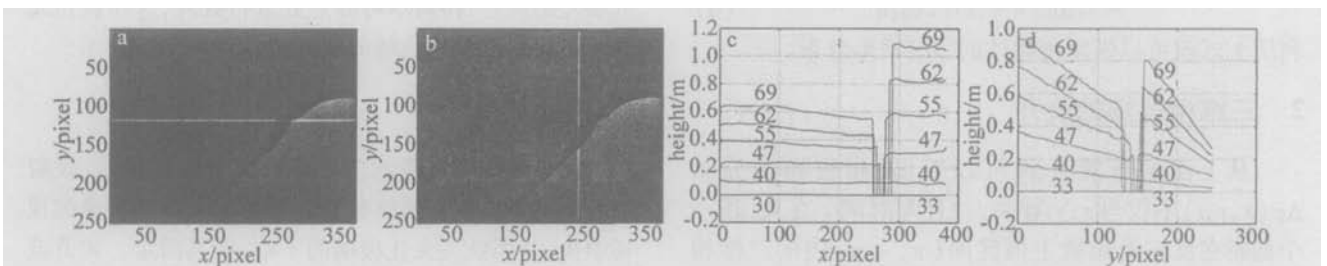


Fig 6 The restored shape and the profile of the shape at different sampling instant

a b—the restored shape and the white marked line c d—the varieties in the white marked line at different sampling instant

程中面形位置的变化情况,如图 6 所示,选取的 6 个时刻分别对应第 33, 40, 47, 55, 62, 69 帧(对应开始拍摄后的第 8, 25ms, 10ms, 11.75ms, 13.75ms, 15.5ms, 17.25ms)。图 6c 和图 6d 分别对应图 6a 和图 6b 中白色标线上的变形量在这 6 个时刻的变化情况,可以看到当玻璃发生震动时,玻璃虽没发生破裂,但位置已发生移动,玻璃破裂后,分成两块,且带有一定的旋转。

4 讨论

傅里叶变换轮廓术只需一帧变形条纹图就能恢复出物体的三维面形的特点使得其在动态过程三维面形测量中独具优点,但在冲击、爆轰等动态过程的研究中,被测三维表面将发生破裂及碎片飞散等过程^[9],为动态过程的三维重建带来困难。本文中提出了一种破裂的动态表面的三维重建方法,这种方法的重点是利用条纹图中裂缝的信息,首先生成一个三维二元控制模板,在该模板的控制下进行三维相位展开。文中以玻璃破裂过程动态面形的三维测量为例,表明了该方法能正确恢复破裂过程面形及其动态变化过程;实验系统的重建精度取决于图像采集系统的拍摄频率,若拍摄频率足够快,采样时间满足抽样定理,则系统的测量精度与传统的 FTP 方法的测量精度相同,约为等效波长的 $1/30$ ^[10, 11],若采样时间不满足抽样定理,则此方法不能正确恢复出物体的面形。如果采用更高帧频的图像探测器,作者提出的方法可望用于冲击、爆轰

等动态过程的三维面形重建中。

参 考 文 献

- [1] TAKEDA M, MUTOH H, KOBAYASHI S. Fourier transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J O S A*, 1982, 72(1): 156~ 160.
- [2] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(24): 3977~ 3982.
- [3] SU X Y, CHEN W J, ZHANG Q C. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(1): 49~ 64.
- [4] WU Ch C, SU X Y. Dynamic 3-D shape detected [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 1996, 7(5): 273~ 278(in Chinese).
- [5] ZHANG Q C, SU X Y. An optical measurement of vortex shape at a free surface [J]. *Opt & Laser Technol*, 2002, 34(2): 107~ 113.
- [6] REN Sh Q, FANG Q. Two-channel phase measuring profilometry used in dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(4): 452~ 455(in Chinese).
- [7] JUDGE T R, BRYANSTON-CROSS P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199~ 239.
- [8] JIANG Zh Y, MAO H, FENG Ch Y. Phase unwrapping algorithm based on breadth-first searching [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(3): 312~ 316(in Chinese).
- [9] TAN X X. OE techniques in experiments of shock wave and detonation physics [J]. *Laser & Infrared*, 1996, 26(3): 210~ 212(in Chinese).
- [10] CHEN W J, SU X Y. A new method for improving measuring accuracy of Fourier transform profilometry [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2002, 29(1): 19~ 22(in Chinese).
- [11] ZHANG L, LU S N, LIN D Y *et al*. The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 90~ 93(in Chinese).
- [4] GUO Y J. Comprehensive evaluation theory and method [M]. Beijing Science Press, 2002, 71~ 76(in Chinese).
- [5] CHENG Ch, MA Y W. Investigation of CO₂ laser resonator with maximum output power [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 346~ 349(in Chinese).
- [6] YU J CAIGH, YANG Q M *et al*. A new method stabilize output intensity of a laser [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(6): 440~ 443(in Chinese).
- [7] ZHOU M L. Similarity engineering [M]. Beijing China Machine Press, 1998, 141~ 143(in Chinese).
- [8] WU B Sh, FANG M, LI R T *et al*. Study on validity of virtual prototype based on similarity theory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(12): 1018~ 1021(in Chinese).
- [9] WANG Y J, LI G Y, XIONG Zh W *et al*. Study on the calculating method of similarity degree between virtual prototype and physical prototype [J]. *Machinery*, 2004, 31(3): 10~ 12(in Chinese).

(上接第 257 页)