

文章编号: 0258-7025(2010)12-3091-07

瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统

马锁冬¹ 朱日宏¹ 李建欣¹ 高志山¹ 罗红娥² 王海林³ 单小琴¹

¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094
² 南京理工大学弹道国防科技重点实验室, 江苏 南京 210094
³ 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 在运动力学、弹道学等研究的一些动态过程中,瞬态飞行目标的三维面形与其结构、形变、应力和烧蚀等情况有着密切的关系,而对其面形的多视角测量目前还无法实现。针对这一难题,基于结构光技术设计并搭建了一套正六边形的测量系统,利用三套投影-摄像装置将正弦光栅多角度、瞬时、同步投影到瞬态飞行目标的表面,采集其条纹图像,再经小波变换处理,最终得到目标的三维面形。实验结果表明,该系统能有效地实现对瞬态飞行目标复杂三维面形的非接触式、多视角、快速测量。

关键词 三维面形测量;瞬态飞行目标;小波变换;瞬时投影;多视角

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3091

A Multi-View Measurement System for Three-Dimensional Surface Distribution of Transient Moving Target

Ma Suodong¹ Zhu Rihong¹ Li Jianxin¹ Gao Zhishan¹
Luo Hong¹e² Wang Hailin³ Shan Xiaoqin¹

¹ School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
² National Defence Research Laboratory of Ballistic, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
³ School of Sciences, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract During the dynamic process of sports mechanics, ballistics, etc., the three-dimensional (3D) surface distribution of the transient moving target is closely related to its structure, deformation, stress, erosion, etc. But the non-contact, multi-view and fast measurement for it is still not realized. In response to this problem, a hexagonal configuration of the measurement system which is based on structured light technology is designed and structured. By using three projectors-camera subsystems, the sinusoidal grating is projected onto the surface of the transient moving target instantaneously and simultaneously. The deformation patterns caught by high-speed CCD are then processed by the wavelet transform. Finally, the 3D surface distributions can be obtained. The experimental results indicate that the system is effective to achieve the non-contact, multi-view and fast measurement for the 3D surface distribution of the transient moving target.

Key words three-dimensional surface measurement; transient moving target; wavelet transform; transient projection; multi-view

收稿日期: 2010-05-24; 收到修改稿日期: 2010-06-18

基金项目: 国防科工局十一五重点项目和重点实验室基金(9140C300101080C30)资助课题。

作者简介: 马锁冬(1984—),男,博士研究生,主要从事精密光学测试理论与技术等方面的研究。

E-mail: masuodong@hotmail.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事精密光学测试理论与技术等方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

在运动力学、弹道学等学科所研究的一系列动态过程中,瞬态飞行目标的三维面形与其结构、形变、应力和烧蚀等情况有着密切的关系,所以对其面形进行瞬时、精确的测量对于科学研究和工程应用具有重要意义。常规的高速摄影技术通过分析被测物体的二维图像只能得到其空间姿态等信息,无法精确测得其三维面形的分布情况。而基于结构光照明的主动光学三维传感技术则能够实现对被测物体三维面形的精确测量。由于该技术具有非接触、测量精度高等优点,在工业检测、质量控制和机器视觉等领域日益受到人们的重视和研究^[1]。主动光学三维传感技术主要分为傅里叶变换轮廓术(FTP)、相位测量轮廓术(PMP)和小波变换轮廓术(WTP)。傅里叶变换轮廓术系统结构简单,数据获取速度快,只需一幅图像即可,适合瞬态测试环境,但是其存在系统测量范围受被测物体高度变化率的限制,频谱可能发生混叠和易受噪声干扰等缺点^[2~7]。相位测量轮廓术^[8,9]具有精度高的优点,但需采集多幅以Phase Stepping相移方式形成的条纹图,限制了其在瞬态测量环境下的应用。小波变换轮廓术利用瞬时频率及小波脊的概念对条纹图像进行分析,提取出正确的相位信息^[10~16],有效地避免了频谱混叠的现象,增大了系统的可测范围,一定程度上抑制了噪声对相位提取的影响,且只需一幅图像即可得到被测物的三维面形信息,具有测量精度高、实时性好的优点。目前,国内外在主动光学三维传感方面的研究主要集中在对静态目标的测试^[3~16]和低高速运动目标的测试^[17~19],而对于瞬态飞行目标(运动速度达1000 m/s及其以上)三维面形的测量则研究较少。在通常的静态目标三维面形测量系统^[1~16]中常采用单个相交型三角光路^[2]测量某一个视角下目标局部的面形分布,或将被测物放置于转动台上进而实现对目标整体面形的测量。但是这些系统所使用的投影-摄像装置都无法向瞬态飞行目标瞬间投射高亮度、高对比度条纹并拍摄对应的条纹图像,所以无法实现对瞬态飞行目标三维面形的多视角、快速测量。在低高速运动目标三维面形测量系统中,王颖等^[17,18]提出的基于单摄像机的虚拟四目立体视觉测量系统虽然实现了对目标面形的多视角同步测量,有效避免了多台高速摄像机拍摄的同轴驱动问题,减少了测量系统成本,但在一定程度上降低了所拍得图像数据的分辨率,由于分光棱镜等器件的引入使得系统较为复杂且装调不便;而张启灿

等^[19]提出的基于傅里叶变换的测量系统以高频闪烁结构光照明高速运动目标,并利用高速摄像机进行拍摄,但只能实现单视角下的测量,且被测物运动速度较瞬态飞行目标低。

针对上述问题,为了能够同时测得多个视角下瞬态飞行目标的三维面形分布,本文基于结构光技术,设计并搭建了一套正六边形结构的多视角测量系统,利用高功率脉冲激光器作为光源将三组正弦光栅多视角、瞬时、同步成像投影到瞬态飞行目标的表面,并使用高速 CCD 抓拍到对应的条纹图像,再根据图像信号的小波变换系数模的最大值与载波频率、相位之间的关系复原调制相位^[10~16],从而实现瞬态飞行目标三维面形的多视角、快速测量。

2 测量原理及测量系统

2.1 系统原理及结构

2.1.1 相交型三角光路原理

主动光学三维传感技术通常采用相交型三角测量光路^[2],其原理如图1所示。图中 $E_p'E_p$ 和 $E_c'E_c$ 分别是投影系统和成像系统的光轴,两光轴与参考平面相交于 O 点。参考平面与 $E_c'E_c$ 相互垂直,是测量物体表面高度变化的参照面。光栅的栅线垂直于平面 $E_p'E_cO$,经投影系统投影在被测物体上。

当光栅像被投影到参考面上时,CCD获取的参考条纹分布为^[2]

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r_0(x, y) \times \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\varphi_0(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $r_0(x, y)$ 为参考面上的非均匀反射率分布函数, f_0 为光栅像的空间基频, $\varphi_0(x, y)$ 为参考平面上的相位分布。在相同的结构参数下,将该光栅像投影到待测物体表面,CCD得到的变形条纹分布为^[2]

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n r(x, y) \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\varphi(x, y)]\}, \quad (2)$$

式中 $r(x, y)$ 为物体表面非均匀反射率分布函数, $\varphi(x, y)$ 为由于物体表面高度变化而引起的相位调制。由图1可见,在投影系统出瞳中心和CCD系统入瞳中心的连线与参考平面平行以及CCD系统光轴与参考面垂直的情况下,被测物体的高度与相位差之间的对应关系为^[2]

$$h(x, y) = \frac{L\Delta\varphi(x, y)}{2\pi Df_0 + \Delta\varphi(x, y)}, \quad (3)$$

式中 L 为CCD系统入瞳到参考面的距离, D 是投

影系统出瞳到 CCD 入瞳的距离。由(3)式可知,只需测量得到被测物体与参考面的相位差 $\Delta\varphi(x, y)$, 光栅像的基频 f_0 以及投影系统光轴与 CCD 光轴之间的夹角 θ , 即可精确重构被测物体的三维面形分布。

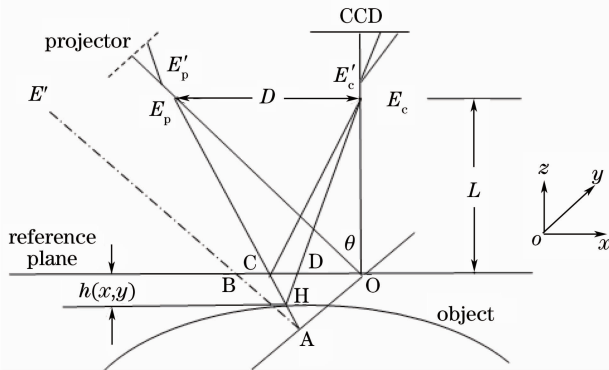


图 1 相交型三角光路原理图

Fig. 1 Schematic graph of crossed-optical-axes

2.1.2 测量系统结构

在图 1 的基础上提出并设计的瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统如图 2 所示。图中 1 为瞬态飞行目标(被测物), 2 为矩形铜丝网靶, 3 为高精度同步触发装置, 4 为高功率脉冲激光器, 5 为数据处理子系统, 6 为正六边形结构光测量子系统, 7 为实验平台。

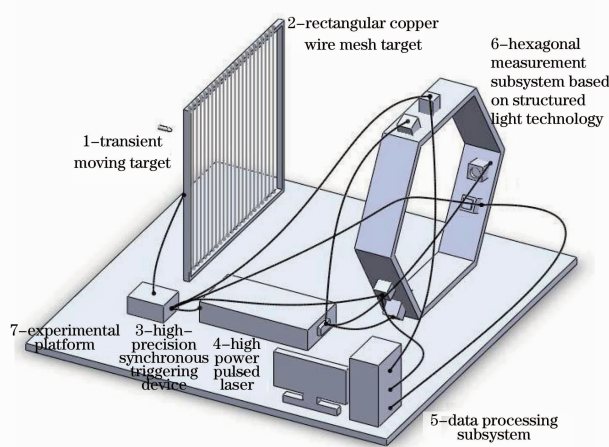


图 2 瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统

Fig. 2 Multi-view measurement system for the three-dimensional surface distribution of transient moving target

当瞬态飞行目标 1 飞行经过铜丝网靶 2 时, 击断网靶上的铜丝, 从而产生一个电信号传输到高精度同步触发装置 3; 经过一个延时, 使得目标 1 飞行至正六边形结构光测量子系统 6 的中心时, 同步触发装置 3 输出一个同步触发信号, 触发脉冲激光器

4 和结构光测量子系统 6 中的高速 CCD 同步工作, 完成对瞬态飞行目标的多视角投影-拍摄; 采集到的图像数据经信号线传输到数据处理子系统 5 中进行处理, 最后得到目标的三维面形分布。

1) 闪频投影-拍摄装置

在 CCD 曝光时间较短的情况下, 由于一般投影用光源的瞬间输出光强有限, 所以导致拍摄到的条纹亮度较低, 对比度和信噪比也较差。而随着系统拍摄速度要求的提高, 高速 CCD 的曝光时间也会相应地缩短。因此本系统利用高功率脉冲激光器、投影光学系统、高速 CCD 组成闪频投影-拍摄装置, 以高功率脉冲激光器作为光源, 提高光源瞬间输出的光能量, 并利用一分三光纤将激光分别导入三套投影-摄像子系统中, 解决了向高速飞行目标瞬间、多视角投射高亮度、高对比度条纹的问题, 而所选用的光纤能有效地减小激光散斑对测量带来的影响。此外在不降低所拍图像数据分辨率的前提下, 通过高精度的同步触发装置解决了多相机及投射光源的同步驱动问题。

闪频投影-拍摄装置的信号时序图如图 3 所示。当被测目标 1 飞行击断铜丝网靶 2 上的铜丝时, 网靶产生一个如图 3(a)所示时长为 $T_1 = 40 \mu s$ 的电信号传输到高精度同步触发装置 3; 经过一个延时 t , 使得目标 1 飞行至正六边形结构光测量子系统 6 的中心时, 同步触发装置 3 输出一个时长 $T_2 = 40 \mu s$ 的触发信号, 利用上升沿触发高速 CCD 产生一曝光时间如图 3(b)所示时长为 $T_3 = 640 \mu s$ 的信号, 再利用下降沿触发脉冲激光器输出如图 3(c)所示时长为 $T_4 = 20 ns$ 的激光脉冲信号。其中延时 t 定义为目标飞行距离与目标飞行速度的比值, 目标飞行距离即为铜丝网靶 2 与正六边形结构光测量子系统 6 之间的距离, 目标飞行速度在目标飞行距离较短时可用目标 1 飞行至铜丝网靶 2 时的速度近似表示, 而该速度则由另一套精密测速系统测量得到。

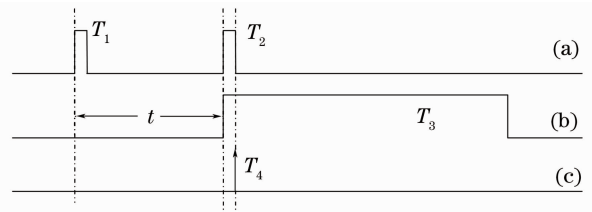


图 3 测量系统时序图

Fig. 3 Time series chart of measurement system

2) 正六边形结构光测量子系统

虽然通常的静态目标三维面形测量系统^[1~16]

和低高速运动目标三维面形测量系统^[17~19]能够实现对目标面形的单视角或者整体测量,但是上述系统均无法实现对瞬态飞行目标三维面形的 360°快速、同步投影测量。因此提出并设计了一套正六边形结构光测量子系统,其具体结构如图 4 所示。光栅采用正弦光栅,其像的条纹周期在系统中心位置约为 1~3 lp/mm 满足系统测量要求^[17~19]; CCD 的分辨率为 4812 pixel × 3248 pixel,快门时间为 1/1700 ~ 1/1.5 s。图中 projector1-CCD1 (1号 CCD), projector2-CCD2(2号 CCD)和 projector3-CCD3(3号 CCD)为 3 套投影-摄像装置,每套装置构成一个相交型三角光路即一个测量子模块,且共面于 zOx 平面(相机光轴互成 120°夹角),结构紧凑、装调方便。投影系统光轴与摄像系统光轴成一定夹角 θ (15°~30°),摄像系统(CCD)入瞳到参考面的距离 L 为 600 mm,并设定瞬态飞行目标沿 y 轴方向(见图 4)飞行。通过该系统的三套投影-摄像装置从三个视角对瞬态飞行目标表面进行条纹投影及拍摄,进而完成对目标三维面形的 360°同步投影测量。

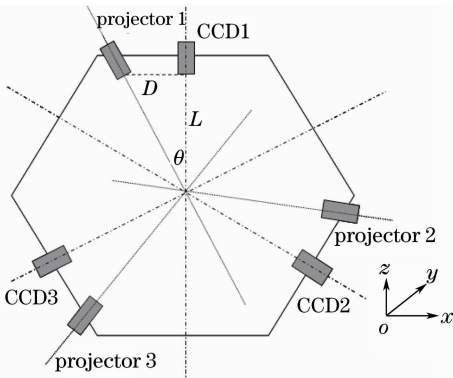


图 4 正六边形结构光测量子系统结构示意图

Fig. 4 Configuration of the hexagonal measurement system based on structured light technology

3) 投影光学系统

在正六边形结构光测量子系统 6 中,基于正弦光栅成像的投影光学系统(如图 4 所示)是闪频投影-拍摄装置的重要组成部分。通过对该光学系统的合理设计,可对影响光栅成像质量的球差、畸变、光场强度非均匀性等进行校正^[20],从而达到瞬态测试环境下对所拍摄图像质量的要求。此外,投影光学系统的光轴与 CCD 光轴的夹角 θ 以及所用正弦光栅的周期则是影响瞬态飞行目标三维面形测量的两个重要因素。只有科学地选择夹角 θ ,设计光栅周期,才能够满足系统测量范围和精度的要求^[10,21]。

a) θ 角大小的选择

如图 1 所示,相交型三角测量光路中参考平面上光栅像的频率^[21]为

$$\nu(x) = \frac{\cos \theta}{d_{\xi}} \left(1 - \frac{2x}{L_p} \sin \theta \right), \quad (4)$$

式中 θ 为投影系统光轴与 CCD 光轴的夹角, d_{ξ} 为与投影光轴 E_pO 相垂直的 AO 面上光栅像的条纹间距, L_p 为 E_pO 的长度。由被测目标面形调制而产生的相位差为

$$\Delta\varphi(x, y) = 2\pi d(x, y) \nu(x) = 2\pi \frac{Dh(x, y)}{L - h(x, y)} \frac{\cos \theta}{d_{\xi}} \left(1 - \frac{2x}{L_p} \sin \theta \right), \quad (5)$$

令 $K(x, y) = \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2\pi} d_{\xi}$, (5) 式可整理为

$$[L - h(x, y)]K(x, y) = Dh(x, y) \cos \theta \left(1 - \frac{2x}{L_p} \sin \theta \right),$$

$$h(x, y) = \frac{LK(x, y)}{K(x, y) + D \cos \theta \left(1 - \frac{2x}{L_p} \sin \theta \right)}, \quad (6)$$

任意位置处被测目标的瞬时高度变化需要满足^[10]

$$\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{1}{3}, \quad (7)$$

(7) 式可化简为

$$\tan \theta < 1 - \frac{6K(x, y) \sin \theta}{K(x, y) + L \sin \theta}. \quad (8)$$

考虑到测量系统结构 $L = 600$ mm, 最终分析可知 $0^\circ < \theta < 38.69^\circ$ 即可满足系统测量要求。

b) 光栅周期的选择

设 P 为所用的正弦光栅周期, P' 为 CCD 上成像的光栅周期, M_c 为 CCD 放大率, M_p 为投影系统的放大率, 则根据分析可知^[21]

$$d(x) = d_{\xi} \frac{1 + \frac{x \sin \theta}{L_p}}{\cos \theta \left(1 - \frac{x \sin \theta}{L_p} \right)}, \quad (9)$$

$$d_{\xi} = P \cdot M_p, \quad (10)$$

$$P' = d(x) \cdot M_c. \quad (11)$$

如图 1 所示, 式中 θ 为投影系统光轴与 CCD 光轴的夹角, d_{ξ} 为与投影光轴 E_pO 相垂直的 AO 面上光栅像的条纹间距, L_p 为 E_pO 的长度。对于空间分辨率为 1.5 lp/mm 的 CCD, 需要满足

$$P' = d(x) \cdot M_c \leq 1.5. \quad (12)$$

结合(12)式,在投影系统和 CCD 的放大率、投影系统光轴与 CCD 光轴的夹角 θ 及 CCD 入瞳到参考面的距离 L 一定的情况下,所用正弦光栅周期为 30~90 lp/mm,即在正六边形结构光测量子系统 6 中心位置正弦光栅像的周期约为 1~3 lp/mm 便能

满足整套系统的测量要求。

2.2 基于小波脊的相位复原算法

基于小波脊的相位复原算法在静态测试中具有较好的面形复原效果^[10~16],但尚未被应用于瞬态测试环境中。利用该算法,采用分析能力较好的复 Morlet 小波作为母函数^[15],对采集到的多个视角下的条纹图像进行二维连续小波变换,提取出小波脊线^[15],并计算得到其对应的包裹相位,再经过相位展开^[22]、相位-高度转换,最终得到被测物体面形信息。

变形条纹图 $g(x, y)$ 的二维连续小波变换为^[15]

$$W_f(a, b, s, \theta) = \langle g(x, y), \psi_{a, b, s, \theta}(x, y) \rangle = s^{-1} \iint g(x, y) \psi^* \left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, r_\theta \right) dx dy, \quad (13)$$

$$\psi_{a, b, s, \theta}(x, y) = \psi \left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, r_\theta \right), \quad (14)$$

式中 $*$ 表示复共轭; $\psi_{a, b, s, \theta}(x, y)$ 是母小波函数 $\psi(x, y)$ 经伸缩、平移及旋转后得到的小波函数序列; s 为尺度因子,实现对母小波函数 $\psi(x, y)$ 的伸缩; a, b 为平移因子,分别沿 x 轴和 y 轴实现对母小波函数 $\psi(x, y)$ 的平移; θ 为旋转角。记变形条纹图 $g(x, y)$ 的小波变换系数 $W_f(a, b, s, \theta)$ 的实部为 $\text{Re}[W_f(a, b, s, \theta)]$, 虚部为 $\text{Im}[W_f(a, b, s, \theta)]$, 则系数的幅值 $A(a, b, s, \theta)$ 和相位 $\varphi(a, b, s, \theta)$ 分别为^[15]

$$A(a, b, s, \theta) = \sqrt{\{\text{Re}[W_f(a, b, s, \theta)]\}^2 + \{\text{Im}[W_f(a, b, s, \theta)]\}^2}, \quad (15)$$

$$\varphi(a, b, s, \theta) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[W_f(a, b, s, \theta)]}{\text{Re}[W_f(a, b, s, \theta)]} \right\}. \quad (16)$$

定义在各个位置不同尺度及旋转角度下,小波系数幅值的最大位置为小波脊 $r(a, b, s_r, \theta_r)$ ^[10~16]

$$r(a, b, s_r, \theta_r) = \max[A(a, b, s_i, \theta_i)], \quad (17)$$

式中 s_i 为各尺度值, θ_i 为各旋转角度, i 为尺度参量 s 和旋转角度 θ 的序列数; s_r 和 θ_r 分别为脊位置下的尺度和旋转角度。该位置对应的相位 $\varphi(a, b, s_r, \theta_r)$ 即为与被测物面形相对应的调制相位的最佳近似^[15]。

3 实验结果及分析

3.1 静态实验结果及分析

为了验证本系统在对被测物三维面形测量方面的可靠性,利用图 4 所示测量系统中的一套投影-摄像子系统对静态物体进行了测试。实验所拍摄到的被测物体(半径为 19 mm 的乒乓球)条纹图如图 5(a)所示,利用二维连续小波变换^[15]提取出感兴趣区域的包裹相位图如图 5(b)所示,再基于可靠性排序相位展开算法^[22]得到如图 5(c)所示的展开相位图,图 5(d)为利用 Matlab 软件显示的经几何关系

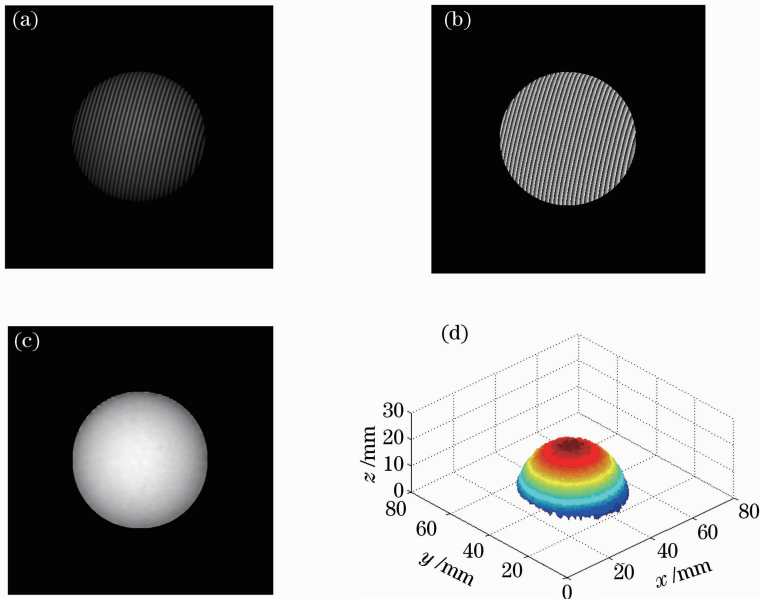


图 5 验证性实验图像。(a)被测乒乓球,(b)感兴趣区域包裹相位图,(c)对应(b)图的展开相位图,(d) Matlab 显示的三维面形分布

Fig. 5 Images of the confirmatory experiment. (a) object (ping-pong), (b) wrapped phase image; (c) unwrapped phase image corresponding to (b), (d) 3D surface distributions showed by Matlab

转换后得到的被测物体三维面形分布(半径为 18.83 mm,测量准确度为 99.11%)。由测量结果可知,这里设计的测量系统及采用的算法能较好地复原出被测物体的三维面形分布情况。

3.2 瞬态实验结果及分析

为了进一步验证该测量系统在对瞬态目标三维面形测量方面的可行性,利用图 2 所示整套系统进行了瞬态实验测试。被测物体最大半径为 8 mm,飞行速度约 1000 m/s。当目标飞行经过系统中心附近时,高精度的同步触发装置触发脉冲激光器,从而将三组正弦光栅分别经三套投影系统同时成像投影到目标表面,并且同步触发高速 CCD 采集多个视角下被测物体上的变形条纹图像,再经计算完成对目标三维面形的多视角、瞬态测量。

图 6 为瞬态实验图像。其中子图 6(a),(c),(e)分别为 1 号,2 号,3 号相机拍摄的目标的变形条纹图,(b),(d),(f)为计算得到的与(a),(c),(e)图所对应的目标三维面形分布,高精度的 360°拼接融合结果有待于后续深入研究。图 6(b),(d),(f)中被测物面形最大半径为 6.95 mm,与实验前的数值

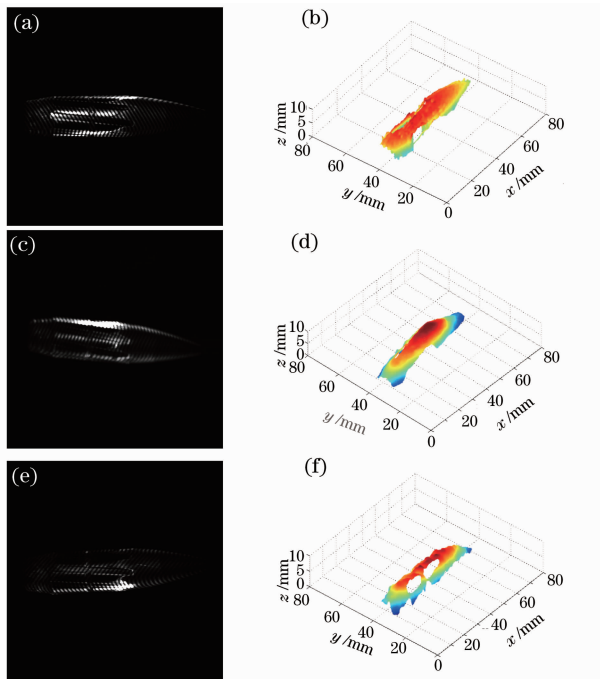


图 6 瞬态实验图像。(a),(b):1 号相机拍摄的目标及其三维面形图;(c),(d):2 号相机拍摄的目标及其三维面形图;(e),(f):3 号相机拍摄的目标及其三维面形图

Fig. 6 Images and the 3D surface shapes of transient experiment. (a),(b)No. 1 CCD; (c),(d) No. 2 CCD; (e),(f) No. 3 CCD

8 mm有偏差,主要是因目标在空气介质的飞行过程中存在一定程度的烧蚀从而导致最大半径值减小。子图中一些空洞区域则是由烧蚀而导致的局部条纹断裂、无条纹等无效区域。由图 6 可见,利用图 2 的瞬态测量系统结合 2.2 节小波复原算法能够有效地测量多个视角下目标物体的三维面形分布,从而实现瞬态飞行目标三维面形的多视角、快速测量。

4 结 论

设计并搭建的由高功率脉冲激光器、矩形铜丝网靶、高精度同步触发装置、数据处理子系统、正六边形结构光测量子系统所组成的瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统,可以有效地采集到目标的变形条纹图像,并基于小波复原算法有效地恢复出多个视角下目标物体的三维面形分布。实验验证了所述测量系统及算法在瞬态测试中的可行性,为基于条纹投影的三维面形测试技术运用到瞬态测量环境中提供了相应的理论与实验依据。而如何有效地实现对整套系统的快速、高精度标定,对测得的多视角数据精确的拼接融合及立体结果的实时显示,进而满足现场测试要求还有待进一步的深入研究。

参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 3 Yang Chuping, Weng Jiawen. Fourier transform profilometry by original grating reconstruction from deformed grating pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1287~1290
杨初平, 翁嘉文. 基准光栅重构傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1287~1290
- 4 Mao Xianfu, Su Xinyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1291~1295
毛先富, 苏显渝, 陈文静等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1291~1295
- 5 He Yuhang, Cao Yiping, Zhong Lijun *et al.*. Improvement on measuring accuracy of digital phase measuring profilometry by frequency filtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 220~224
何宇航, 曹益平, 钟立俊等. 采用频域滤波提高数字相位测量轮廓术的测量精度[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 220~224
- 6 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Empirical mode-decomposition method for eliminating extension of zero component in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 664~669
李思坤, 陈文静, 苏显渝等. 傅里叶变换轮廓术中基于经验模式分解抑制零频的方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 664~669
- 7 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan *et al.*. Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2009, **29**(10): 2780~2785
- 吴双卿, 张引, 张三元等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2780~2785
- 8 X. Peng, S. M. Zhu, C. J. Su *et al.*. Model-based digital moiré topography[J]. *Optik*, 1999, **110**(4): 184~190
- 9 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 10 Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 647~653
- 孙娟, 陈文静, 苏显渝等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 647~653
- 11 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of gabor transform to 3-D shape analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996
- 翁嘉文, 钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. 光子学报, 2003, **32**(8): 993~996
- 12 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three-dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 197~202
- 周翔, 赵宏. 基于 Mexican hat 小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 197~202
- 13 Cesar A. Sciammarella, Tae-eui Kim. Determination of strains from fringe patterns using space-frequency representations[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(11): 3182~3193
- 14 René A. Carmona, Wen L. Hwang, Brun Torrèsani. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1997, **45**(10): 2586~2590
- 15 Munther A. Gdeisat, David R. Burton, Michael J. Lalor. Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(34): 8722~8732
- 16 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier-fringe patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
- 翁嘉文, 钟金钢. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 454~459
- 17 Wang Ying, Zhang Guangjun, Chen Dazhi. Tether insect motion parameters measurement system based on stereo vision[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2005, **26**(6): 733~737
- 王颖, 张广军, 陈大志. 基于虚拟四目的立体视觉固定飞行昆虫运动参数测量系统[J]. 航空学报, 2005, **26**(6): 733~737
- 18 Wang Ying, Zhang Guangjun, Shang Hongyan. Virtual stereo vision system for measuring motion parameters of a free flying insect[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(3): 53~57
- 王颖, 张广军, 尚鸿雁. 虚拟立体视觉自由飞行昆虫运动参数测量系统[J]. 光电工程, 2008, **35**(3): 53~57
- 19 Qican Zhang, Xianyu Su. High-speed optical measurement for the drumhead vibration [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3110~3116
- 20 Shang Xiaoyan, Quan Guiqin, Tian Ailing. A design on grating projective system [J]. *J. Xi'an University of Science and Technology*, 2002, **22**(3): 364~366
- 尚小燕, 权贵秦, 田爱玲. 光栅投影系统设计[J]. 西安科技学院学报, 2002, **22**(3): 364~366
- 21 Giuseppe Schirripa Spagnolo, Giorgio Guattari, Carmine Sapia *et al.*. Contouring of artwork surface by fringe projection and FFT analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **33**(2): 141~156
- 22 M. Arevalillo Herráez, D. R. Burton, M. J. Lalor *et al.*. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(35): 7437~7444