

doi: 10.3788/gzxb20164508.0812002

基于单帧变形条纹的物体三维位移和速度测量

曹森鹏^{1,2}, 曹益平¹

(1 四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

(2 平顶山学院 电气与机械工程学院, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 用隔行扫描摄像机采集到的运动物体单帧变形条纹测量三维位移和速度. 该方法将一帧变形条纹分成两个单场, 利用傅里叶变换轮廓术重建三维面形, 从单场条纹的调制度中提取二值化模板, 计算质心获得亚像素匹配定位点, 通过双三次插值和标定, 实现了一个场周期时间内三个维度上的位移和平均速度的测量. 匀速运动物体实验结果表明: 被测速度的最大绝对误差为 0.6 mm/s, 相对误差为 0.57%. 该方法仅用一帧变形条纹即可测量运动物体的三维位移和速度, 提高了时间分辨率和测量准确度.

关键词: 测量; 三维位移; 三维速度; 傅里叶变换轮廓术; 亚像素定位; 隔行扫描

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0812002-6

3D Displacement and Velocity Measurement Based on a Single Frame Deformed Fringe for a Moving Object

CAO Sen-peng^{1,2}, CAO Yi-ping¹

(1 College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2 College of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan, Henan 467000, China)

Abstract: 3D displacement and velocity were measured by using a single frame fringe which is recorded by an interlaced scanning camera for a moving object. One frame deformed fringe is operated by dividing into two single field fringes, reconstructing 3D surface shapes by directly using Fourier transform profilometry, extracting 2D binarization templates from the modulation of single fields, computing the centroid to get sub-pixel locating point, and processing the shape data by bi-cubic interpolation and calibration, it can accomplish the measurements of 3D displacement and 3D average velocity within the interval of a field period time. In the 3D space experiment with constant velocity of a 3D object, the maximum absolute error of measured velocity is 0.6mm/s, and the relative error is 0.57%. This method needs only one frame deformed fringe to measure 3D displacement and velocity, and improves temporal resolution and measuring precision.

Key words: Measurement; 3D displacement; 3D velocity; Fourier transform profilometry; Sub-pixel localization; Interlaced scanning

OCIS Codes: 120.1880; 100.2650; 100.6890; 110.3010; 120.6650

0 引言

三维空间上位移和速度的光学测量是精密测试领域的研究热点, 被广泛应用于工业自动化加工和工业

检测等诸多领域. 常用的方法有飞行时间法^[1-2]、摄影测量法^[3-4]、条纹投影法^[5-7]等. 通常测量一个位移需要两帧或两帧以上的图像, 测量一个速度需要记录一个时间间隔. 基于面结构光条纹投影法的三维运动矢量

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2009ZX02204-008)和国家高技术研究发展计划(No. 2007AA01Z333)资助

第一作者: 曹森鹏(1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为光学三维测量和光信息处理等. Email: spcao168@163.com

导师(通讯作者): 曹益平(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等. Email: ypciao@scu.edu.cn

收稿日期: 2016-02-19; **录用日期:** 2016-04-18

<http://www.photon.ac.cn>

测量准确度高、速度快. 该方法测量一个三维运动矢量, 需要两帧不同时刻的变形条纹. 成像器件的扫描方式有一次扫描一帧图像的逐行扫描和隔行扫描. 隔行扫描先采集奇场(或偶场)图像, 经过一个场周期时间后, 再采集偶场(或奇场), 最后合成一帧图像, 因奇偶两场图像不在同一时刻采集, 每一帧图像中包含两个时刻的物体运动状态信息^[8-11]. 曹森鹏等把隔行扫描摄像机引入到动态面形测量中^[8-12], 基于单场条纹的傅里叶变换轮廓术和傅里叶变换去隔行算法^[8-10], 实现了彩色条纹的动态相位测量轮廓术法对运动物体的三维面形测量^[11-12].

本文提出了一种基于单帧变形条纹测量运动物体三维位移和速度的方法: 隔行扫描摄像机采集运动物体的一帧变形条纹, 条纹分为奇场和偶场两个单场条纹; 在单场条纹与其对应帧条纹的傅里叶频谱中, 相应的基频相位信息相同; 通过傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)重建相隔一个场周期时间的两个三维面形信息^[8]; 提取每个单场条纹的调制度, 通过阈值法获取二值化模板, 定位灰度质心, 获得重建三维面形上具有亚像素准确度的匹配点的像素坐标, 对重建面形进行插值获取空间上对应的高度值, 对摄像机标定, 把像素坐标转换成空间坐标, 获得物体同一点在两个重建三维面形上匹配点的三维空间坐标, 进而计算该物体在一个场周期时间内的三维位移和三维平均速度.

1 原理

当正弦光栅投影到三维空间中的运动物体时, 隔行扫描摄像机获取的一帧变形条纹为 $g(x, y)$, 它由先后相隔一个场周期时间采集的奇场条纹 $g_o(x, y)$ 和偶场条纹 $g_e(x, y)$ 组成^[10-12]. 当两个单场条纹分别映射到原有帧幅面时, $g(x, y)$ 表示为

$$g(x, y) = g_o(x, y) + g_e(x, y) \quad (1)$$

下标 o 和 e 分别代表奇场和偶场(下同), x, y 为图像坐标系的像素坐标. 单场条纹的隔行信息缺失: 在平行于摄像机扫描方向上的相邻两行中, 其中一行含有物体面形信息, 是摄像机正常采集的有效数据, 另一行不含物体信息, 灰度值全为 0. 奇场条纹的奇行有物体信息, 偶行全为 0; 偶场条纹的偶行有物体信息, 奇行全为 0; 帧条纹 $g(x, y)$ 的奇行数据对应构建的奇场条纹 $g_o(x, y)$ 的奇行信息, 偶场数据 $g_e(x, y)$ 对应偶场条纹的偶行信息. 故单场条纹的强度分布可看作是摄像机正常采集的一个帧变形条纹被一个周期为 2pixels 的梳状调制信号空间抽样的结果. 假设摄像机在隔行扫描方式是奇场优先(奇场先被采集), t_1 和 t_2 分别是采集奇场条纹和偶场条纹的时刻, T 为一种视频制式下隔行扫描成像的一个场周期时间. 显然 $T = t_2 -$

t_1 . 奇场和偶场条纹分别表示为

$$\begin{cases} g_o(x, y) = g_i(x, y) \cdot u_o(y) \\ g_e(x, y) = g_i(x, y) \cdot u_e(y) \end{cases} \quad (2)$$

$g_i(x, y)$ 和 $g_{i_e}(x, y)$ 分别表示奇场和偶场条纹对应的帧条纹, 即

$$\begin{cases} g_i(x, y) = a_i(x, y) + b_i(x, y) \cos(2\pi f_1 x + \varphi_i(x, y)) \\ g_{i_e}(x, y) = a_{i_e}(x, y) + b_{i_e}(x, y) \cos(2\pi f_1 x + \varphi_{i_e}(x, y)) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别表示条纹的背景和对比度光强, f_1 为正弦光栅的空间基频, $\varphi(x, y)$ 表示物体表面高度变化引起的相位调制, 包含物体的高度信息. $u_o(x, y)$ 和 $u_e(x, y)$ 分别表示奇场和偶场条纹对应的梳状函数, 即

$$\begin{cases} u_o(y) = \frac{1}{2} \text{comb}\left(\frac{y}{2}\right) \\ u_e(y) = \frac{1}{2} \text{comb}\left(\frac{y-1}{2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)第二个式子中, 只是 y 方向坐标移动了一个像素.

以奇场条纹重建物体三维面形的过程为例. 对奇场条纹进行二维快速傅里叶变换(two-dimensional Fast Fourier Transform, FFT), 计算出 $g_o(x, y)$ 的傅里叶谱: 将 $g_o(x, y)$ 、 $g_{i_e}(x, y)$ 和 $u_o(x, y)$ 的二维傅里叶变换频谱分别记为 $G_o(f_x, f_y)$ 、 $G_{i_e}(f_x, f_y)$ 和 $U_o(f_x, f_y)$, 有

$$G_{i_e}(f_x, f_y) = A_{i_e}(f_x, f_y) + Q_{i_e}(f_x - f_1, f_y) + Q_{i_e}^*(f_x + f_1, f_y) \quad (5)$$

式中 $A_{i_e}(f_x, f_y)$ 、 $Q_{i_e}(f_x - f_1, f_y)$ 和 $Q_{i_e}^*(f_x + f_1, f_y)$ 分别表示 $a_{i_e}(x, y)$ 、 $1/2 b_{i_e}(x, y) \exp[i(2\pi f_1 x + \varphi_{i_e}(x, y))]$ 和 $1/2 b_{i_e}(x, y) \exp[-i(2\pi f_1 x + \varphi_{i_e}(x, y))]$ 的傅里叶变换频谱. $Q_{i_e}(f_x - f_1, f_y)$ 和 $Q_{i_e}^*(f_x + f_1, f_y)$ 都含有物体高度的相位信息, 分别对应 $+1$ 、 -1 级频谱, 滤出其中的任一频谱, 就可重建物体三维面形.

$$U_o(f_y) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f_y - \frac{k}{2}\right) \quad (6)$$

$$G_o(f_x, f_y) = G_{i_e}(f_x, f_y) * U_o(f_y) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[G_{i_e}\left(f_x, f_y - \frac{k}{2}\right) \right] = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[A_{i_e}\left(f_x, f_y - \frac{k}{2}\right) + Q_{i_e}\left(f_x - f_1, f_y - \frac{k}{2}\right) + Q_{i_e}^*\left(f_x + f_1, f_y - \frac{k}{2}\right) \right] \quad (7)$$

式中星号 $*$ 表示卷积, k 为整数.

从式(5)~(7)可看出, $G_o(f_x, f_y)$ 是不同位置的 δ 函数与 $G_{i_e}(f_x, f_y)$ 的卷积, 结果是把 $G_{i_e}(f_x, f_y)$ 复制到该脉冲所在频谱的空间位置, 并乘以该脉冲幅值的 0.5 倍; 但 $G_{i_e}(f_x, f_y)$ 频谱的相位信息保持不变. 据文

献[8-12]分析,根据图像大小与基频的关系可知,在奇场条纹的频谱面上,仅有 $k=0, \pm 1$ 时的频谱,而且 $k=\pm 1$ 的频谱的中心分别分布在频谱面的最后一行和第一行上,这些频谱都不完整,不能用来重构物体面形信息.只有 $k=0$ 时,三个频谱(即 $0.5A_{t_i}(f_x, f_y)$ 、 $0.5Q_{t_i}(f_x - f_1, f_y)$ 和 $0.5Q_{t_i}^*(f_x + f_1, f_y)$)的中心都在中间行上,且频谱完好.只要滤出 $0.5Q_{t_i}(f_x - f_1, f_y)$ 或 $0.5Q_{t_i}^*(f_x + f_1, f_y)$ (这里滤出 $0.5Q_{t_i}(f_x - f_1, f_y)$),做逆傅里叶变换,得到一个复数信号

$$g_{or}(x, y) = (1/4)b_{t_i}(x, y) \exp [i(2\pi f_1 x + \varphi_{t_i}(x, y))] \quad (8)$$

它的相位分布为

$$\varphi_{t_i}(x, y) + 2\pi f_1 x = \text{Im}\{\ln g_{or}(x, y)\} \quad (9)$$

$\text{Im}\{\}$ 表示提取复数的虚部.因此,从奇场条纹提取的相位分布与其对应帧条纹提取的相位分布相同^[7].对于发散照明情况,单纯由高度引起的位相调制 $\Delta\varphi_{t_i}(x, y)$ 为

$$\Delta\varphi_{t_i}(x, y) = \varphi_{t_i}(x, y) - \varphi_0(x, y) \quad (10)$$

式中, $\varphi_0(x, y)$ 是静态参考平面上参考条纹的相位分布. $\Delta\varphi_{t_i}(x, y)$ 通过位相展开,得到展开相位 $\Delta\Phi_{t_i}(x, y)$.利用李万松等提出的四平面法^[13]进行径向方向上的标定,即物体的空间高度分布 $Z_{t_i}(x, y)$ 为

$$\frac{1}{Z_{t_i}(x, y)} = d_1(x, y) + \frac{d_2(x, y)}{\Delta\Phi_{t_i}(x, y)} + \frac{d_3(x, y)}{\Delta\Phi_{t_i}^2(x, y)} \quad (11)$$

式(11)是考虑了测量系统镜头的像差和畸变等因素而建立的相位-高度映射非线性关系的二次曲线方程, $d_1(x, y)$ 、 $d_2(x, y)$ 和 $d_3(x, y)$ 都是只与测量系统结构有关的待测系数;测量系统一定时,它们为常量.计算 $d_1(x, y)$ 、 $d_2(x, y)$ 和 $d_3(x, y)$,需采集与参考平面距离不同并且已知的四个平面(包括参考平面)的条纹图像,计算参考平面外的三个平面与参考平面的展开相位差,测量区域内每个点均可建立三个独立方程构成的方程组,从中可解出这三个常量.

同理,利用FTP对偶场条纹进行处理,获得 t_2 时刻的高度分布 $Z_{t_2}(x, y)$ 为

$$\frac{1}{Z_{t_2}(x, y)} = d_1(x, y) + \frac{d_2(x, y)}{\Delta\Phi_{t_2}(x, y)} + \frac{d_3(x, y)}{\Delta\Phi_{t_2}^2(x, y)} \quad (12)$$

物体的调制度反映了物体的轮廓特征^[14-15],物体在两个时刻的调制度分布定义分别为

$$\begin{cases} M_{t_1}(x, y) = 2\text{abs}(g_{or}(x, y)) = (1/2)b_{t_1}(x, y) \\ M_{t_2}(x, y) = 2\text{abs}(g_{er}(x, y)) = (1/2)b_{t_2}(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

abs表示取模.分别运用二值化方法(如最大类间方差法、最大熵法、四元树法、变分法等)进行处理.通过设置一个阈值 W ,二值化为1(物体部分)和0(非物体部分),有

$$N_{t_i}(x, y) = \begin{cases} 1 & M_{t_i}(x, y) \geq W \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

$$N_{t_i}(x, y) = \begin{cases} 1 & M_{t_i}(x, y) \geq W \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (14)$$

再分别求其质心^[16],获得亚像素准确度的定位点 $S_{t_1}(x_1, y_1)$ 和 $S_{t_2}(x_2, y_2)$,这两点的坐标分别是物体三维面形上同一点在不同位置的像素坐标;对重建的三维面形进行双三次插值,获取三维物体同一点在两个空间位置上的特征匹配点的高度坐标 $Z_{t_1}(x_1, y_1)$ 和 $Z_{t_2}(x_2, y_2)$.

选用张正友标定法^[17-18],获得摄像机内外参量,利用像素坐标与世界坐标系间的关系,获得匹配点的三维空间坐标 $Q_1(X_1, Y_1, Z_1(X_1, Y_1))$ 和 $Q_2(X_2, Y_2, Z_2(X_2, Y_2))$,计算三个维度上的位移,有

$$\begin{cases} \Delta X = X_2 - X_1 \\ \Delta Y = Y_2 - Y_1 \\ \Delta Z = Z_{t_2}(X_2, Y_2) - Z_{t_1}(X_1, Y_1) \end{cases} \quad (15)$$

则位移 l 大小为

$$l = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (16)$$

方向角 α 和 β 为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(\Delta X / \Delta Y) \\ \beta = \arcsin(\Delta Z / l) \end{cases} \quad (17)$$

α 为在 $X-Y$ 平面内分位移与 Y 轴正方向的夹角, β 为位移与 $X-Y$ 平面的夹角.三个方向上的平均速度为

$$\begin{cases} \bar{v}_x = \Delta X / T \\ \bar{v}_y = \Delta Y / T \\ \bar{v}_z = \Delta Z / T \end{cases} \quad (18)$$

则平均速度大小为

$$\bar{v} = l / T \quad (19)$$

其方向与位移方向相同.

这样,通过对运动物体一帧变形条纹的处理,就可测量该物体在一个场周期时间段内的三维位移和三维平均速度.

2 实验与分析

为验证所提方法的有效性,进行实验与分析.实验装置如图1,利用两个卓立汉光电动位移系统(位移分辨率:0.002 5 mm)来产生被测物体在三个维度方向上的运动,在与摄像机光轴垂直的平面内,光电动位移器带动物体的直线运动可分解为世界坐标系 $X-Y$ 平面两个方向上的运动(按照摄像机标定的世界坐标系坐标轴方向: X 、 Y 、 Z 轴的正方向分别为竖直向下,水平向右,垂直于 $X-Y$ 平面指向摄像机).测量系统摄像机正对参考平面,投影仪斜对物体的模式;日立HCP-75X投影仪投影一帧正弦光栅到被测运动物体上,选用隔行扫描、标清格式(PAL制式下帧频为25fps)的PulnixTM-6AS CCD摄像机,接16 mm镜头,采集一帧参考条纹如图2(a).被测物体在 $X-Y$ 面内的匀速运动

速度为 45 mm/s, Z 方向上匀速运动速度为 95 mm/s. 采集图像清晰的标准为: 在曝光时间内物体因运动在摄像机成像面上产生的像移量不超过 0.3 个成像单元. 在物体速度和测量系统确定的条件下, 根据摄像机针孔模型的物像关系和标定结果, 计算的曝光时间为 0.001 2 s, 该摄像机的快门速度为 1/50~1/31000s, 为减少噪声影响, 选择曝光时间最接近且小于 0.001 2 s, 本文选择 1/2 500 s, 适当调节光圈和增益, 确保摄像机采集的单场图像清晰并具有较高的对比度. 当物体匀速运动时, 该摄像机实时采集变形条纹的一段视频, 利用非线性编辑软件解帧, 获得一组序列图像, 从中选取一帧变形条纹并将大小截成 200×200 pixels, 如图 2 (b), 该帧条纹分成奇场和偶场两个单场, 如图 3(a)和 (b).



图 1 实验系统
Fig. 1 Experimental system

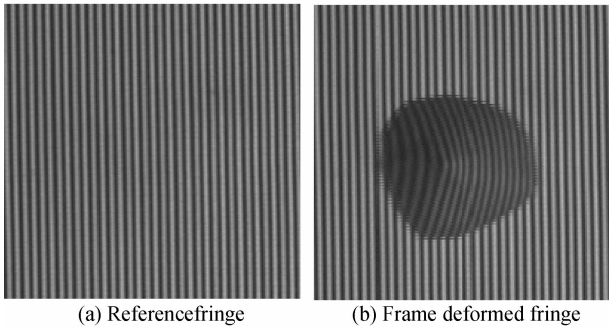


图 2 条纹
Fig. 2 Fringes



图 3 单场条纹
Fig. 3 Single-field fringes

单场条纹分别直接利用 FTP 重建面形, 并利用四平面法进行 Z 方向上的标定, 重建的三维面形如图 4.

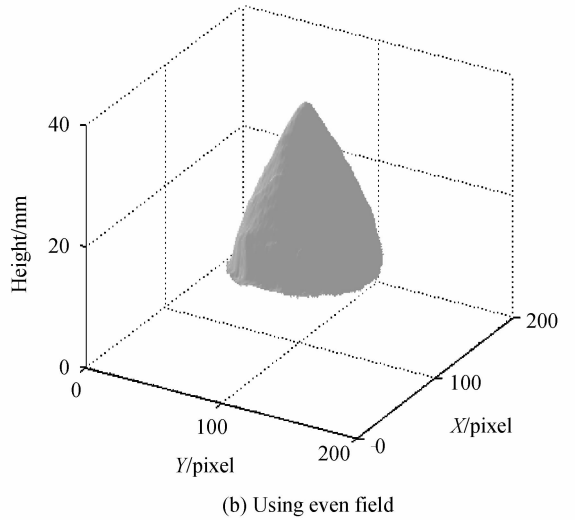
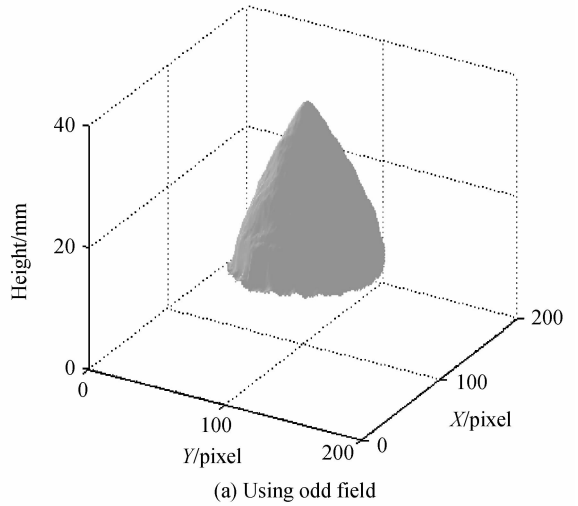


图 4 重建的面形
Fig. 4 Reconstructed 3D shapes

提取的奇偶场条纹的调制度如图 5, 利用最大类间方差法^[19]分别对其进行初步阈值评估, 再逐渐减小阈值, 使二值化为 1 的部分更逼近真实物体的底部轮廓, 计算质心获取亚像素准确度的坐标定位(在相邻两次计算对应轴坐标的最大误差都小于 0.02pixel 为结束阈值继续减小的判据), 获得的二值化模板如图 6, 计算得到两个质心坐标分别为 S_o (95.81, 108.34) 和 S_e (95.21, 110.43).

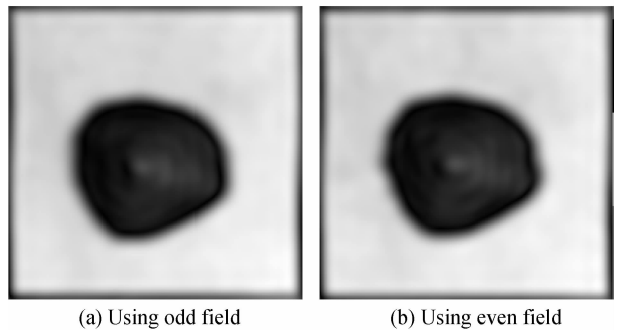


图 5 调制度
Fig. 5 Modulation

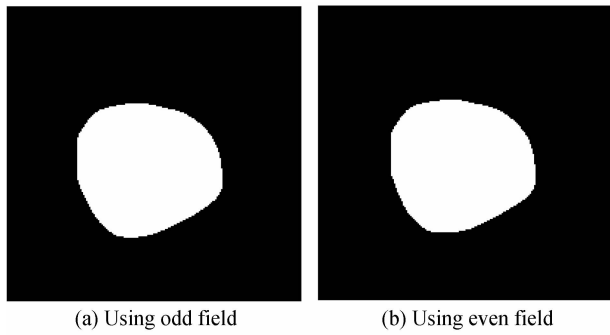


图6 二值化模板
Fig. 6 Binarization templates

分别对奇偶场重建的面形进行双三次插值,获取三维面形上两个匹配点 Q_1 和 Q_2 的高度值分别为 Z_{t_1} (95.81,108.34) 和 Z_{t_2} (95.21,110.43),分别用“+”标记在插值后的重建面形俯视图上,如图7.

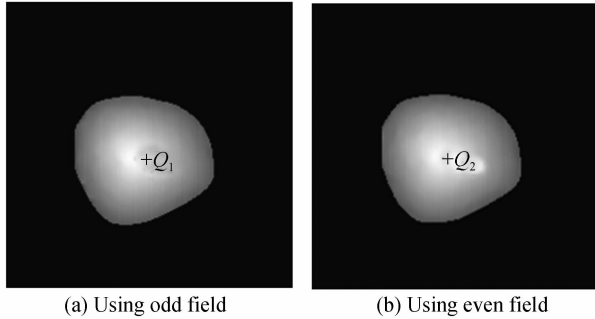


图7 插值后面形的匹配点(俯视图)

Fig. 7 Matched points of interpolated 3D shapes (planform)

对不同位置和姿态的20张平面棋盘格标定数据按照张正友法进行标定,获得摄像机的内外参量如表1和表2.

表1 摄像机内参量(pixel)

Table 1 Intrinsic parameters of the camera (pixel)

Focal length	Principle point	Distortion coefficient
1907.74	337.75	$[-0.45155, 0.64745, 0.00053, 0.00001, 0]$
2056.11	245.05	—

表2 摄像机外参量

Table 2 Extrinsic parameters of the camera

Rotation matrix			Translation vector/pixel
0.003 789	0.999 9	0.009 466	-79.83
0.998 7	-0.003 307	-0.050 39	-68.74
-0.050 35	0.009 645	-0.998 7	780.67

摄像机的外参量是相对于第一个标靶所在平面为X-Y平面,Z轴正方向指向摄像机的空间三维坐标系而言.

通过像素坐标系与空间坐标系坐标间的对应关系^[17],解出两个匹配点 Q_1 和 Q_2 的空间坐标.该物体两个状态的时间间隔是一个场周期时间 $T=0.02$ s,由于物体在两个电动位移轨道的分运动都是匀速直线运

动,其合速度也是匀速直线运动,所以实际的平均速度就是上述合速度.匹配点的三个方向上的坐标、位移及速度如表3.

表3 匹配点的空间坐标、位移及速度
Table 3 Space coordinate, displacement and velocity of matched points

	X/mm	Y/mm	Z/mm
Q_1	84.58	88.32	32.96
Q_2	84.30	89.17	31.07
l/mm	-0.28	0.85	-1.89
$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	-14.0	42.5	-94.5

通常正弦光栅投影的FTP测量系统的最高准确度可达0.1 mm,采用亚像素定位技术获得空间点的定位准确度可达0.01 mm,所以表3给出的坐标数据是以mm为单位的两位小数的有效数据.

经过计算,位移 $l=2.09$ mm,方向角 $\alpha=-18.2^\circ$, $\beta=-64.7^\circ$;速度 $v=104.5$ mm/s,方向与位移方向相同.而运动物体的实际速度为105.1 mm/s,最大绝对误差为0.6 mm/s,相对误差为0.57%.误差较小,说明该方法可以有效测量物体的三维位移和三维速度.

3 结论

使用隔行扫描摄像机,利用单帧变形条纹测量物体三维位移和速度.该方法只需运动物体的一帧变形条纹,就可计算一个场周期时间内的三维位移和三维速度.理论分析了该方法的可行性,实验验证了该方法的有效性.与传统的条纹投影法相比,该方法不但保持了传统方法的准确度,还提高了时间分辨率.

参考文献

- [1] PENNE J, SCHALLER C, HORNEGGER J, *et al.* Robust real-time 3D respiratory motion detection using time-of-flight cameras[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2008, **3**(5): 427-431.
- [2] LEE S, JEONG K, PARK J, *et al.* Three-dimensional object motion and velocity estimation using a single computational RGB-D camera[J]. *Sensors*, 2015, **15**(1): 995-1007.
- [3] SYNNERGREN P, GOLDREIN H T. Dynamic measurements of internal three-dimensional displacement fields with digital speckle photography and flash x rays[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(28): 5956-5961.
- [4] TANG Zheng-zong, LIANG Jin, GUO Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112007. 唐正宗, 梁晋, 郭成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112007.
- [5] ZENG Ai-un, WANG Xiang-hao. Micro-displacement measurement based on grating projection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(3): 394-398. 曾爱军, 王向朝. 基于光栅成像投影的微位移检测方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 394-398.
- [6] ZHANG Qi-can, SU Xian-yu. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(8): 3110-3116.
- [7] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can. Dynamic 3-D shape

- measurement method; a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 191-204.
- [8] CAO Sen-peng, ZHANG Qi-can, WANG Qing-feng, *et al.* Dynamic 3-D shape measurement using the two fields' images of an interleaved camera[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(2): 225-229.
曹森鹏, 张启灿, 王庆丰, 等. 基于隔行扫描奇偶场图像的动态物体三维面形测量[J]. *光电子 • 激光*, 2009, **20**(2): 225-229.
- [9] CAO Sen-peng, CAO Yi-ping, ZHANG Qi-can. Fourier transform profilometry of a single-field fringe for dynamic objects using an interlaced scanning camera [J]. *Optics Communications*, 2016, **367**: 130-136.
- [10] CAO Sen-peng, WANG Wei-feng, XUE Xi-chang. Dynamic 3-D shape measurement based on de-interlaced images by Fourier transform[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(6): 736-741.
曹森鹏, 王伟锋, 薛喜昌. 基于傅里叶变换去隔行图像的动态3维面形测量[J]. *激光技术*, 2013, **37**(6): 736-741.
- [11] CAO Sen-peng, CAO Yi-ping, LIU Xiao-yong. Moving pose real-time detection based on interlacing scan color CCD camera[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(12): 2316-2322.
曹森鹏, 曹益平, 刘效勇. 基于隔行扫描彩色 CCD 的运动姿态实时检测[J]. *光电子 • 激光*, 2014, **25**(12): 2316-2322.
- [12] CAO Sen-peng, CAO Yi-ping, LU Ming-teng, *et al.* 3D shape measurement for moving scenes using an interlaced scanning colour camera[J]. *Journal of Optics*, 2014, **16**(12): 125411.
- [13] LI Wan-song, SU Li-kun, SU Xian-yu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792-796.
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792-796.
- [14] SU Xian-yu, SU Li-kun, LI Wan-song, *et al.* A new 3-D profilometry based on modulation measurement[C]. SPIE, 1998, **3558**: 1-7.
- [15] PENG Kuang, CAO Yi-ping, WU Ying-chun, *et al.* On-line three-dimensional measurement method based on low modulation feature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(7): 0708006.
彭旷, 曹益平, 武迎春, 等. 基于低调制度特征的在线三维测量方法[J]. *中国激光*, 2013, **40**(7): 0708006.
- [16] SU Yin, FAN Qi, WANG Yun-fei, *et al.* Fourier transform method for interferogram analysis with high accuracy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1112004.
粟银, 范琦, 王云飞, 等. 干涉条纹的高准确度傅里叶变换分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1112004.
- [17] ZHANG Zheng-you. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. International Conference on Computer Vision, 1999, 666-673.
- [18] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [19] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, **9**(1): 62-66.