

doi:10.3788/gzxb20174609.0912002

# 基于 SURF 算法的在线三维测量方法

李建, 曹益平, 陈澄, 万莹莹, 付光凯, 王亚品

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:**提出了一种采用加速鲁棒特征算法匹配运动物体的特征点,实现在线三维测量的方法.该方法只需投影一固定的正弦光栅到在线运动中的被测物体表面上,使投影光栅线垂直运动方向,当物体每移动相同的距离,由 CCD 采集到相应的变形条纹图,从中提出对应的背景光场,借助 SURF 算法对各帧背景光场的物体进行特征匹配,即可获得一组具有等步相移量的等效相移条纹图,从而采用等步相移算法可重构出在线运动物体的三维面形.实验验证了该方法的有效性和可行性,并与在线 FTP 方法进行了比较,所提方法的平均绝对误差小于在线 FTP 方法的二分之一,均方根误差小于在线 FTP 方法的四分之一.

**关键词:**在线三维测量;像素匹配;SURF 算法;特征匹配;等步长相移算法;相位展开;测量

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0912002-8

## On-line Three-Dimension Measurement Method Based on SURF Algorithm

LI Jian, CAO Yi-ping, CHEN Cheng, WAN Ying-ying, FU Guang-kai, WANG Ya-pin  
(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** An on-line three-dimensional measuring method based on speeded up robust features algorithm is proposed. Only one fixed sinusoidal grating is projected onto the moving measured object to guarantee the fringe direction perpendicular to the moving direction. While the object moves at the same spacing, the corresponding deformed patterns are captured by the CCD camera respectively. Then the background patterns can be extracted from the corresponding captured deformed patterns. With the aid of Speeded Up Robust Features (SURF) feature points matching algorithm on the background patterns, a group of equivalent phase shifting deformed patterns with the same shifting phase can be cut out. So the 3D surface of the online moving object can be reconstructed. The experimental results show the feasibility and effectiveness of the proposed method. Moreover, compared with the online Fourier Transform Profilometry (FTP) method, its average absolute error is less than one-half of that of the online FTP and its root mean square error is less than one quarter of that of the online FTP.

**Key words:** On-line three-dimensional measurement; Pixel matching; SURF algorithm; Feature matching; Equal phase-shifting algorithm; Phase unwrapping; measurement

**OCIS Codes:** 120.2830; 100.5088; 120.5050; 100.6890

## 0 引言

随着工业技术的快速发展,工业生产流水线的应用愈加广泛,在线三维测量由于具有非接触、快速、高精度等优势,被广泛应用于生产流水线测量<sup>[1-3]</sup>,常用的三维测量方法有傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)<sup>[4-6]</sup>、相位测量轮廓术(Phase Measuring Profilometry, PMP)<sup>[7-9]</sup>等.FTP 测量具有单帧获取,全场测量等优点,只需获取一帧变形条纹,对其进行傅里叶变换后,滤出频谱中包含物体三维信息的基

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项目(No.2007AA01Z333)资助

第一作者:李建(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学三维测量和光信息处理. Email:1175111818@qq.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:ypcao@scu.edu.cn

收稿日期:2017-04-01;录用日期:2017-05-22

频分量,经过傅里叶逆变换即可获得被测物体的三维形貌信息.但由于 FTP 是对变形条纹的频谱进行处理,存在频谱的混叠、泄露等现象,同时在滤波过程中,物体的非基频信息被滤除,因此 FTP 的测量精度相对较低.在采用面结构光三维测量方法中,PMP 是目前精度最高的一种方法.在线 PMP 重建物体三维面形,依赖于每帧变形条纹图之间的点对点解相计算,因此需要对各帧变形条纹进行像素匹配,获得物体像素坐标一一对应的等效相移变形条纹,正确解相后即可恢复出在线运动物体的三维面形信息.钟立俊等人<sup>[10]</sup>提出一种适合在线检测的改进算法,郑旭等人<sup>[11]</sup>提出一种基于二值化调制度层析的快速在线三维测量方法,彭旷等人<sup>[12]</sup>提出一种基于低调制度特征的在线三维测量方法,袁寒等人<sup>[13]</sup>提出一种采用尺度不变特征变换匹配算法(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)匹配修正后的图像,以此来实现在线三维测量的方法.

本文提出一种基于加速鲁棒特征(Speeded Up Robust Features, SURF)算法<sup>[14]</sup>的在线测量方法.从各帧变形条纹图中提出含有物体特征信息的背景光场,物体的特征信息能反映出物体所在变形条纹中像素坐标,借助 SURF 算法对物体的特征信息进行像素匹配,获取物体像素坐标一致的等效相移变形条纹,由等步长相移算法即可恢复在线运动物体的三维轮廓信息.

## 1 在线三维测量原理

在线三维测量原理如图 1.由光栅投影仪(DLP)投影一周期为  $P$  的正弦光栅到在线运动中的待测物体表面,光栅的条纹方向垂直于物体的运动方向,待测物体沿  $x$  方向匀速运动,由 CCD 以相同时间间隔依次采集 5 帧变形条纹图,对应的变形条纹图的光强可表示为

$$I_n(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos[\varphi(x, y) + (n-1)\delta]\} \quad (n=1, 2, \dots, 5) \quad (1)$$

式中,  $R(x, y)$  为物体表面反射率,  $A(x, y)$  为背景光强,  $B(x, y)$  为条纹对比度,  $\varphi(x, y)$  为受物体高度调制的相位,  $\delta$  为物体等步距移动产生的等效相移,由于待测物体相对 CCD 运动,使采集到的各帧

变形条纹中物体像素坐标不是一一对应,需要对每帧变形条纹进行像素匹配后才可用于计算.像素匹配后,采用图像剪裁的方法对变形条纹  $I_n(x, y)$  截取,获得等步相移量的等效相移变形条纹  $I'_n(x, y)$ ,由改进的 Stoilov 算法<sup>[15]</sup>可解得相位分布为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{2[I'_2(x, y) - I'_4(x, y)]}{2I'_3(x, y) - I'_1(x, y) - I'_5(x, y)} \sin \delta \right\} \quad (2)$$

式中

$$\sin \delta = \sqrt{1 - \left\{ \frac{I'_1(x, y) - I'_5(x, y)}{2[I'_2(x, y) - I'_4(x, y)]} \right\}^2} \quad (3)$$

由式(2)可知,得到的相位是分布在  $(-\pi, \pi)$  之间的截断相位,对截断相位使用相位展开算法展开后得到其连续的相位分布  $\varphi(x, y)$ ,由相位与高度之间的映射关系<sup>[16-17]</sup>,可以获取物体高度分布  $h(x, y)$  为

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\varphi'(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\varphi'^2(x, y)} \quad (4)$$

式中,  $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$  和  $c(x, y)$  三个参数可由标定获得.

## 2 基于 SURF 算法的像素匹配方法

分析可知,由 CCD 采集到的变形条纹图,需进行像素匹配后,才可以进行解相等在线测量过程.本文从 CCD 采集到的各帧变形条纹图中提取出含有物体特征信息的背景光场,借助 SURF 算法对物体特征信息进行匹配,实现每帧变形条纹的像素匹配.

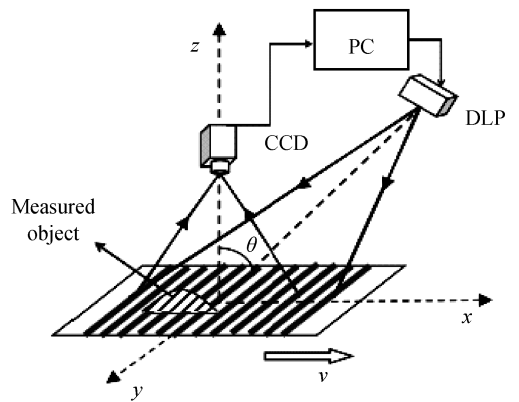


图 1 在线 PMP 系统

Fig.1 Sketch of on-line PMP system

## 2.1 背景光场的提取

背景光场提取过程如图2.在采集到的如图2(a)所示变形条纹中,空域的背景光场对应频域中的零频分

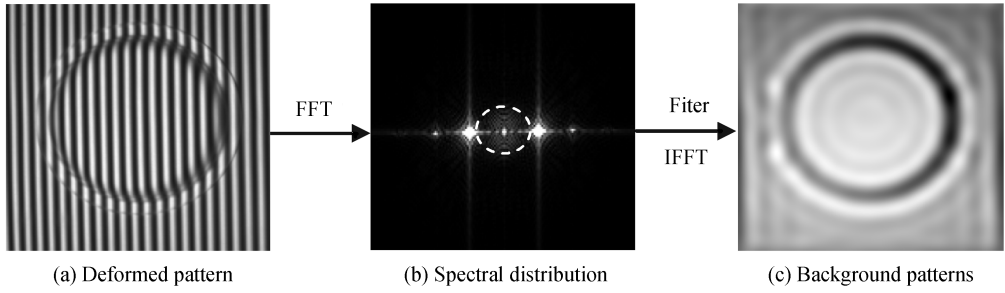


图2 背景光场提取

Fig.2 Extract the background patterns

量.对式(1)做傅里叶变换

$$G_n(f_x, f_y) = G_{n_0}(f_x, f_y) + G_{n_1}(f_x, f_y) + G_{-n_1}(f_x, f_y) \quad (n=1, 2, \dots, 5) \quad (5)$$

式中,  $G_{n_0}(f_x, f_y)$ 、 $G_{n_1}(f_x, f_y)$ 和  $G_{-n_1}(f_x, f_y)$ 分别为第  $n$  帧变形条纹的 0 级频谱、+1 级频谱和-1 级频谱,如图 2(b)所示.由低通滤波器滤出 0 级频谱  $G_{n_0}(f_x, f_y)$ ,并对其进行逆傅里叶变换可得

$$P_n(x, y) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} G_{n_0}(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (n=1, 2, \dots, 5) \quad (6)$$

$P_n(x, y)$ 即为提取的背景光场,如图 2(c)所示.在测量过程中物体的运动位置由各帧背景光场中包含的物体特征信息确定.

## 2.2 采用 SURF 算法进行像素匹配

SURF 算法的特征点检测是基于 Hessian 矩阵的,背景光场中每个像素点都需建立一个 Hessian 矩阵.

对于背景光场中的一个像素点  $X=(x, y)$ 在尺度空间因子为  $\sigma$  的 Hessian 矩阵定义为

$$H(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $L_{xx}(x, \sigma)$ 是  $X$  点处高斯函数二阶偏导数  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$ 与背景光场的卷积,其中  $g(\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$ .  $L_{xy}(x, \sigma)$ 和  $L_{yy}(x, \sigma)$ 含义相似.

在 SURF 算法中,为了提高卷积的运算速度,Bay 等人<sup>[14]</sup>提出使用方框滤波模板近似代替高斯二阶偏导,如图 3 所示,方框滤波模板是  $\sigma = 1.2$  时的高斯二阶偏导的近似,模板大小为  $9 \times 9$ ,灰色区域的值为 0,图 3(a)~图3(c)分别是高斯二阶偏导沿  $x$ 、 $y$ 和  $xy$ 方向的近似.将方框滤波模板与待分析背景光场图像进行卷

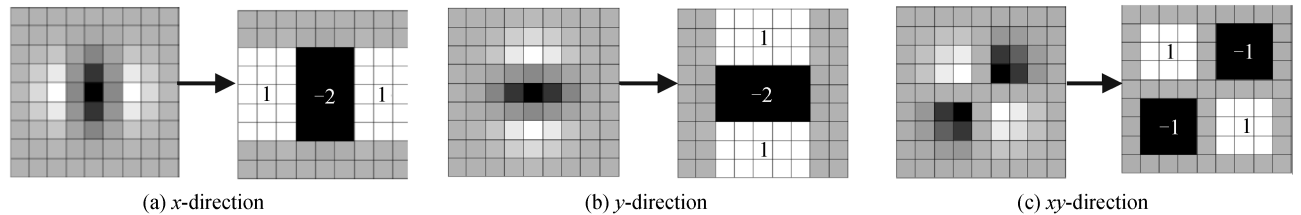


图3 高斯二阶偏导及其近似

Fig.3 Gaussian second order partial derivative and its approximation

积的结果用  $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$ 和  $D_{yy}$ 表示,得到近似 Hessian 矩阵  $H_{approx}$ ,其行列式为

$$\det(H_{approx}) = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 \quad (8)$$

式中,  $\omega$  为权重系数,一般取  $0.9$ <sup>[14]</sup>.经方框滤波模板滤波后,得到背景光场的响应图,其由背景光场中每个像素  $H_{approx}$  矩阵行列式的值构成.

为获得不同尺度下的特征点,使用不同大小的方框滤波模板与背景光场求取  $H_{approx}$  矩阵行列式的响应图,构建图像的尺度空间金字塔.每四层滤波模板为一阶,如表 1,在第一阶中,最底层的滤波模板尺寸为  $9 \times$

9, 相邻滤波模板尺寸相差 6 个像素, 模板的尺寸依次为  $9 \times 9$ 、 $15 \times 15$ 、 $21 \times 21$ 、 $27 \times 27$ , 模板尺寸 ( $N \times N$ ) 与对应的尺度值  $s$  之间的关系为  $s = 1.2 \times N / 9$ , 之后每阶中滤波模板尺寸相差的大小分别为 12、24、48 像素等. 若背景光场尺寸远大于滤波模板尺寸, 尺度空间的阶数可继续增加. 尺度空间金字塔构建完成后, 将尺度空间响应图中每个点与其  $3 \times 3 \times 3$  的三维邻域内的 26 个点进行比较, 若该点是最大值或是最小值时, 则作为初步的特征点. 而后使用插值方法<sup>[18]</sup>对特征点进行筛选, 确定特征点的位置和所在的尺度值. 如图 4(a) 所示.

表 1 前 4 阶层使用的滤波模板大小

Table 1 The filter side lengths for 4 different octaves

Octave 1	9	15	21	27
Octave 2	15	27	39	51
Octave 3	27	51	75	99
Octave 4	51	99	147	195

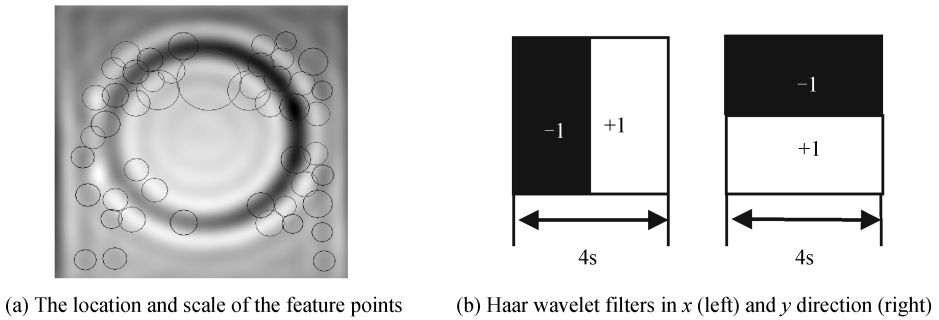


图 4 特征点及 Haar 小波

Fig.4 The feature points and Haar wavelet filters

确定特征点位置后, 以特征点所在位置为圆心,  $6s$  ( $s$  为该特征点对应的尺度值) 为半径的邻域内, 计算  $60^\circ$  扇形内所有点在  $x$ 、 $y$  方向的 Haar 小波 (边长为  $4s$ ) 响应总和, 分别沿  $x$ 、 $y$  方向的 Haar 小波如图 4(b) 所示, 黑色部分为 -1, 白色部分为 +1. 旋转扇形使其遍历整个圆形区域, 将 Haar 小波响应最大值的扇形的方向作为该特征点的方向, 如图 5(a) 所示. 以特征点为中心, 取一个边长为  $20s$  的矩形, 旋转矩形使其方向与特征

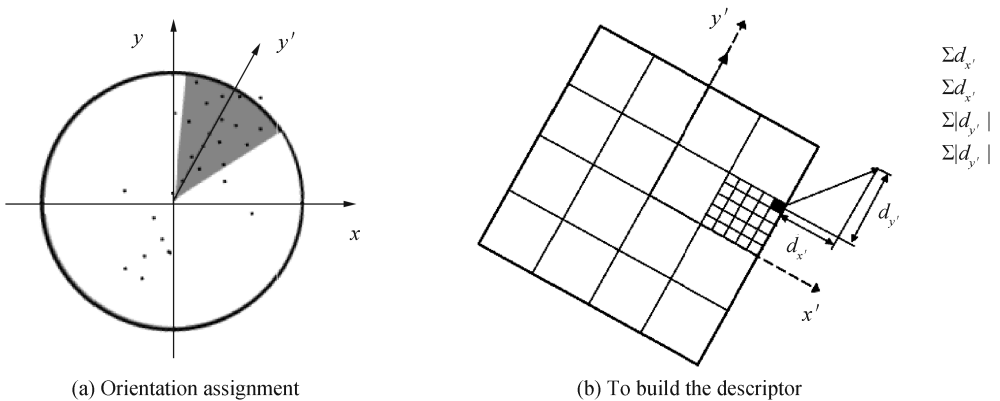


图 5 确定特征点方向和生成特征描述子向量

Fig.5 Determine the orientation of the feature points and to build the descriptor

点主方向一致. 将矩形区域分为  $4 \times 4$  个子区域, 在每个子区域内, 计算  $5s \times 5s$  范围内垂直于主方向和沿主方向的 Haar 小波 (边长为  $2s$ ) 响应, 分别为  $d_{x'}$  和  $d_{y'}$ , 如图 5(b) 所示. 在每个子区域中对  $d_{x'}$ 、 $d_{y'}$ 、 $|d_{x'}|$  和  $|d_{y'}|$  进行求和得到四维矢量

$$V = (\sum d_{x'}, \sum |d_{x'}|, \sum d_{y'}, \sum |d_{y'}|) \quad (9)$$

因此每个特征点都有  $4 \times 4 \times 4 = 64$  维特征描述向量. 采用最近邻匹配法, 对特征点的描述向量, 计算特征点之间的欧氏距离, 其表达式为

$$d(F_k, F_{k+1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{64} (f_{ki} - f_{(k+1)i})^2} \quad (10)$$

式中,  $F_k$ 、 $F_{k+1}$  分别为第  $k$  帧、第  $k+1$  帧条纹背景光场中提取的 SURF 特征点集合,  $f_{ki}$ 、 $f_{(k+1)i}$  分别为  $F_k$ 、 $F_{k+1}$  中的特征点描述向量.由欧氏距离计算出两个特征点之间的最近邻距离和次近邻距离,若最近邻距离与次近邻距离之比小于设定的阈值,则匹配成功.在最近邻匹配法中,可能会有一些误匹配点对,使用 RANSAC 算法<sup>[19]</sup> 去除误匹配点对.在提纯后的特征点对中,提取出特征点对所在背景光场中的位置信息,计算两帧背景光场中物体特征点平均像素坐标的改变量,即是变形条纹中物体的位移量.采用图像剪裁的方法截取对应变形条纹中含有物体高度信息的区域,即可得到物体像素坐标一致的等效变形条纹图,等效变形条纹同时也具有等步的等效相移.

### 3 实验及结果分析

为验证所提方法的有效性和实用性,进行了大量的实物测试实验,实验系统如图 1,其中 DLP 采用型号为 CP-HX6500 的数字光投影仪,CCD 型号为 MCV1000M,镜头型号为 VM2514MP,镜头的焦距是 25 mm,光圈范围是 F1.4-C,视角为 20°,步进电机控制一载有待测物体的平移工作台做匀速直线运动,由于镜头视场的边缘位置会发生畸变,物体需放置于镜头视场的中心区域进行测量,将设计好的一个数字正弦光栅由 DLP 投影到在线运动中的待测物体上且使光栅条纹严格垂直运动方向,控制 CCD 以相同时间间隔采集 5 帧受物体高度调制的变形条纹并存储于计算机内.对所采集的五帧变形条纹进行基于 SURF 算法的像素匹配,采用图像剪裁的方法提取五帧等效等步相移变形条纹,利用上述在线 PMP 方法重构在线运动中的物体三维面形.

实验中对图 6 所示的心形物体进行在线三维测量.以第一帧和第五帧为例来说明提取等效等步相移变形条纹的过程.图 7(a)和图 7(b)分别是 CCD 采集到的第 1 帧  $I_1$  和第 5 帧  $I_5$  变形条纹图.由于物体的在线运动,两帧变形条纹中对应的物体像素坐标并不一致.从变形条纹中提出对应的背景光场,采用 SURF 算法匹配两背景光场中物体特征信息如图 7(c)和图 7(d)所示,由这些对应特征点对即可得到物体的位移量,以  $I_1$  为参照,将  $I_5$  按得到的位移量反向移动,如图 7(e)和图 7(f)所示,可以看出,此

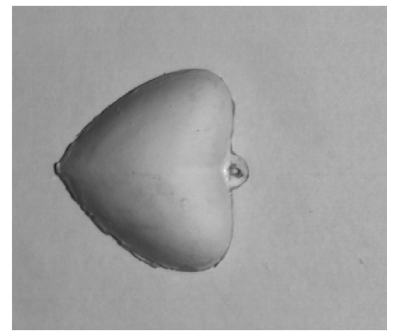


图 6 被测物体  
Fig.6 Measured object

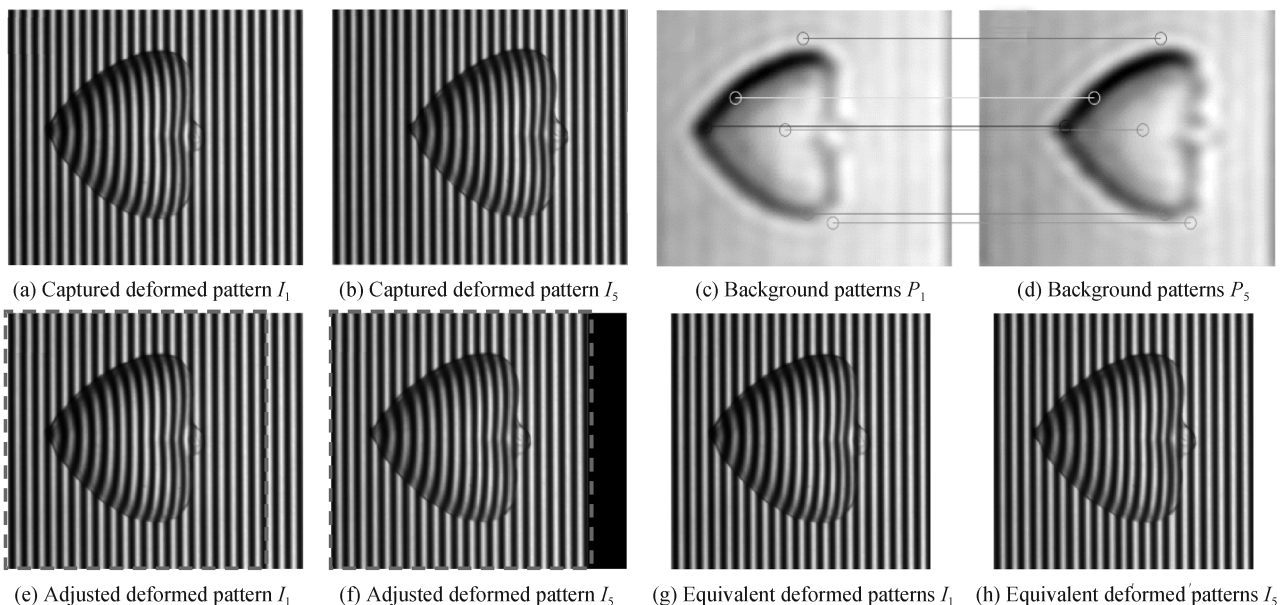


图 7 特征匹配及结果  
Fig.7 Feature matching and results

时两帧变形条纹中物体的坐标已经匹配一致了,但在  $I_5$  左边部分溢出视场而右边部分因缺少信息被补零后呈现黑色区域,如果直接进行解相,势必造成黑色区域的解相错误,在两帧变形条纹中截取同一含有物体高度信息的区域,得到等效变形条纹图  $I'_1$  和  $I'_5$ ,如图 7(g)和图 7(h)所示,等效变形条纹中物体的像素坐标是一一对应的,同时也具有等效相移。

同理对第 2、3、4 帧变形条纹与第 1 帧也进行匹配,可获得 5 帧等步等效变形条纹,采用武迎春<sup>[15]</sup>等提出的改进 Stoilov 算法即可重构出在线运动物体的三维面形.图 8 是所提方法与 FTP 方法测量心形物体的对比实验结果.图 8(a)是由在线 FTP 方法恢复出的物体三维面形,图 8(b)是采用所提方法得到的物体三维面形,同时将图 8(a)和图 8(b)中的心形物体的挂钩部分分别进行放大显示,对比分析可知,由于 FTP 方法存在滤波行为,重构的物体存在较高的失真,尤其反映在物体边沿信息的丢失,由图 8(a)和图 8(b)中的放大部分可明显看出,图 8(a)中心形物体的挂钩形态基本无法显现.而 8(b)中的挂钩形态清晰可见.为了进一步对比分析,分别提取第 200 行的剖面如图 8(c)和图 8(d)所示.从图 8(c)和图 8(d)中虚线部分可以看出,在线 FTP 方法重构出的物体三维轮廓丢失了物体部分细节,而所提方法重构出的物体三维面形中,物体的细节部分较为完整,边缘轮廓清晰。

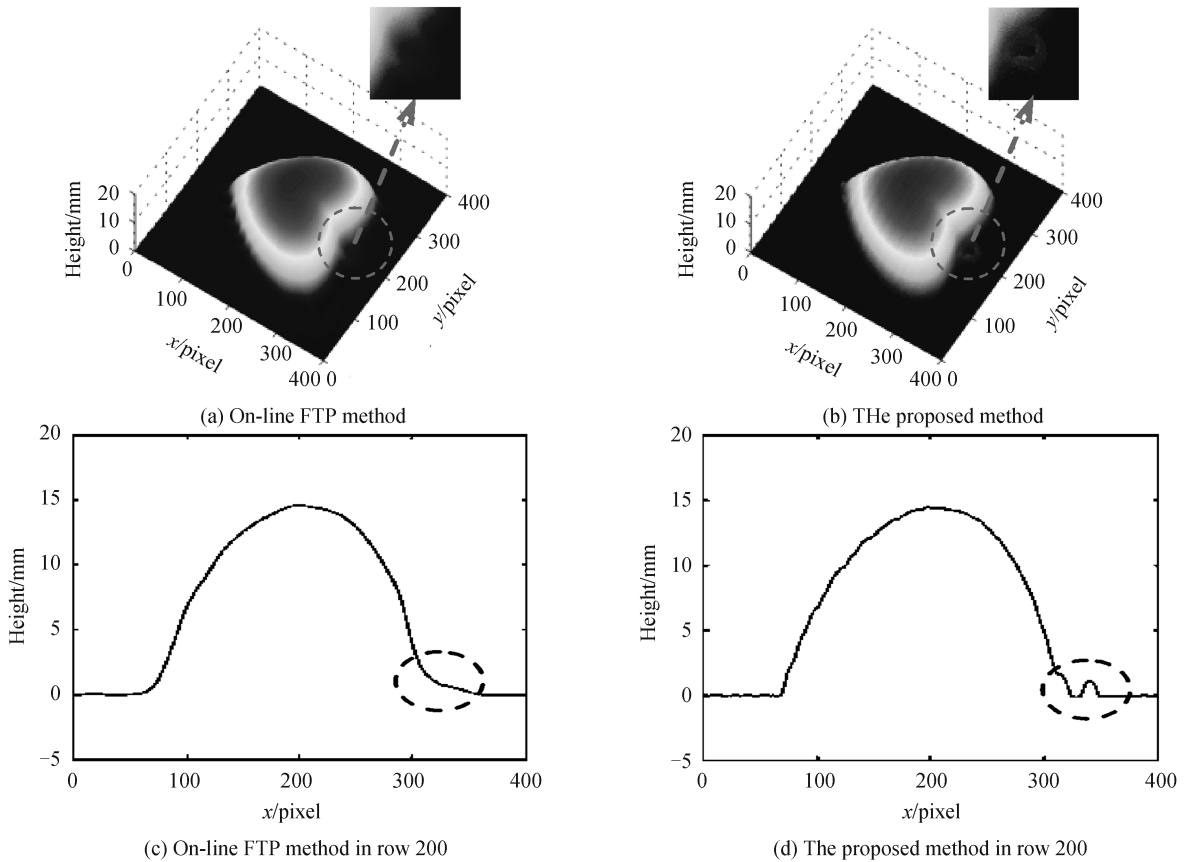


图 8 重构结果

Fig.8 Reconstructed results

三维测量中常用平均绝对误差  $\delta = \frac{\sum |h(i, j) - H|}{n}$ 、均方差  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum [h(i, j) - \bar{h}]^2}{n}}$  来评价测量

精度,其中  $h(i, j)$ 为测量高度, $H$  为标准高度, $\bar{h}$  为测量高度的平均值, $n$  为测量的总像素数.为验证所提方法的精确性和重复性,对已知不同高度的块规进行测量,块规的高度由激光比长仪测得分别为 3.000 3、6.000 2、8.999 8、12.000 1、15.000 2 mm,而所提方法测量精度是亚毫米级,块规的高度可分别用其标称值 3、6、9、12、15 mm 表示.由于块规属于阶跃型物体,相位展开时只对包含块规的部分进行相位展开.从像素匹配后的变形条纹中提取块规的调制度,经过二值化计算得到相位展开时所需的模板,借助模板确定需要进行相位展开的点,采用相位展开算法对块规的截断相位展开后,由相位与高度之间的映射关系,即可获得块规的

高度分布.使用所提方法对高度分别为 3、6、9、12、15 mm 的块规进行测量,测量结果如表 2 所示.表中  $H$  为块规的高度, $\delta_1$ 、 $\sigma_1$  和  $\delta_2$ 、 $\sigma_2$  分别为在线 FTP 方法和所提方法恢复结果对应的平均绝对误差、均方差.由表 2 的数据可知,采用所提方法恢复出块规高度的平均绝对误差不超过 0.12 mm,均小于 FTP 方法平均绝对误差的二分之一;均方差不超过 0.09 mm,均小于 FTP 方法测量均方差的四分之一.表明测量精度和重复性均优于在线 FTP 方法.在实时性方面,所提方法的像素匹配所耗时间为 2.280 1 s,在测量过程中,需使用 CCD 采集五帧变形条纹并解算出物体的三维面形,恢复出物体有一定的延时.

表 2 不同高度块规的测量误差(mm)  
Table 2 Measuring errors of different height block gauge/mm

$H$	3	6	9	12	15
$\delta_1$	0.255	0.279	0.198	0.183	0.204
$\delta_2$	0.119	0.086	0.089	0.076	0.084
$\sigma_1$	0.335	0.360	0.269	0.242	0.278
$\sigma_2$	0.087	0.064	0.069	0.057	0.065

为了进一步检验所提方法的重复性和可靠性,对高度分别为 3、6、9、12、15 mm 的块规进行了多次测量.测量的结果如图 9 所示,图 9(a)是 FTP 多次测量各种块规的平均绝对误差,图 9(b)是所提方法多次测量各种块规的平均绝对误差,图 9(c)是 FTP 多次测量各种块规的均方差,图 9(d)是所提方法多次测量各种块规的均方差.对比图 9(a)和图 9(b)可知,所提方法比在线 FTP 方法的平均绝对误差要小,对比图 9(c)和图 9(d)可知,所提方法的均方差也小于在线 FTP 方法.以高度为 9 mm 的块规为例,使用 FTP 方法测量的平均高度为 9.233 mm,测量高度的均方差为 0.122 mm.所提方法测量的平均高度为 9.090 mm,测量高度的均方差为 0.017 mm.表明所提方法测量重复性和可靠性均优于在线 FTP 方法.

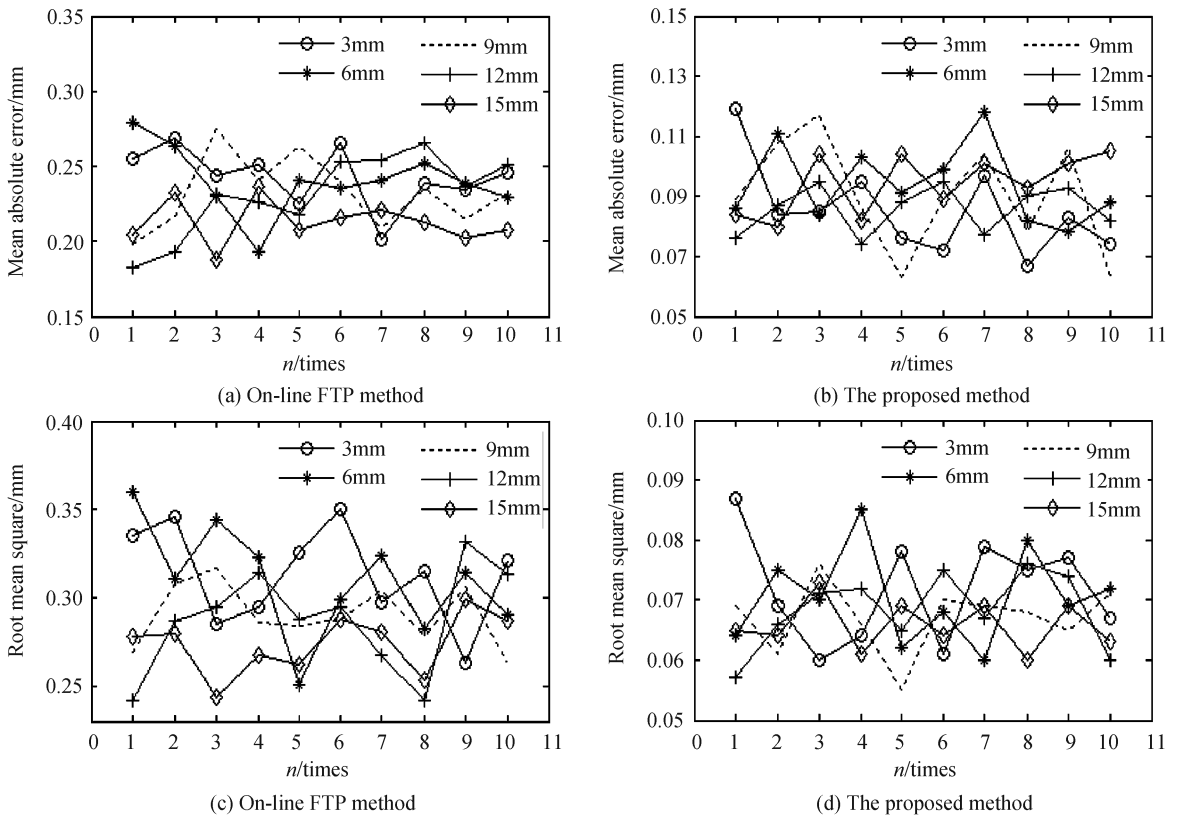


图 9 块规的测量误差分析  
Fig.9 Measurement error analysis of block gauge

## 4 结论

本文提出了一种基于 SURF 算法的在线三维测量方法.从变形条纹中提取出背景光场,由 SURF 算法对背景光场中包含物体的特征信息进行匹配,得到每帧变形条纹中物体的位置信息,截取对应变形条纹中含

有物体高度信息的区域,即可得到物体像素坐标一致的等效变形条纹图,采用改进的 Stoilov 算法来重构出在线运动物体的三维面形,实验验证了该方法的有效性和可行性,适用于在线三维测量。

### 参考文献

- [1] DAI Shi-jie, SHAO Meng, WANG Zhi-ping, *et al.* Study on the two-step method to remove the background in 3D measurement of titanium blade[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(8): 1540-1547.  
戴士杰, 邵猛, 王志平, 等. 钛合金叶片三维测量中背景去除的两步法研究[J]. *光子学报*, 2014, **25**(8): 1540-1547.
- [2] TIAN Zi-xia, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(12): 125-134.  
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(12): 125-134.
- [3] LI Kun, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan, *et al.* A new method for online three dimensional inspection without Marked [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(2): 62-65  
李坤, 曹益平, 陈永权, 等. 一种无需标记的在线三维测量方法[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(2): 62-65.
- [4] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shape[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(24): 3977-3982.
- [5] CAO Sen-peng, CAO Yi-ping. 3D displacement and velocity measurement based on a single frame deformed fringe for a moving object[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0812002.  
曹森鹏, 曹益平. 基于单帧变形条纹的物体三维位移和速度测量[J]. *光子学报*, 2016, **45**(8): 0812002.
- [6] LUO Feng, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Eliminating zero spectra in Fourier transform profilometry by application of Hilbert transform[J]. *Optics Communications*, 2016, **365**: 76-85.
- [7] ZHU Lin, CAO Yi-ping, HE Da-wu, *et al.* Grayscale imbalance correction in real-time phase measuring profilometry [J]. *Optics Communications*, 2016, **376**: 72-80.
- [8] ZHAO Xian-ling, LIU Jian-sheng, ZHANG Hua-yu, *et al.* Measuring the 3D shape of high temperature objects using blue sinusoidal structured light[J]. *Measurement Science & Technology*, 2015, **26**(12): 125205.
- [9] PENG Kuang, CAO Yi-ping, WU Ying-chun, *et al.* A dual-frequency online PMP method with phase-shifting parallel to moving direction of measured object[J]. *Optics Communications*, 2017, **383**: 491-499.
- [10] ZHONG Li-jun, CAO Yi-ping, YU Rui-zhi. Improved algorithm adapting to on-line 3D inspection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(6): 1503-1507.  
钟立俊, 曹益平, 喻睿智. 一种适合在线三维检测的改进算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1503-1507.
- [11] ZHENG Xu, CAO Yi-ping. A fast on-line 3D measuring algorithm based on two-value modulation delamination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1443-1448.  
郑旭, 曹益平. 基于二值化调制层析的快速在线三维测量算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(8): 1443-1448.
- [12] 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.
- [13] YUAN Han, CAO Ying-ping, CHEN Cheng, *et al.* Online phase measuring profilometry for rectilinear moving object by image correction[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(11): 113104-113104.
- [14] BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L V. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2006, **110**(3): 404-417.
- [15] WU Ying-chun, CAO Yi-ping, ZHONG Li-jun. An improved method of stoilov algorithm adapting to phase measuring profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 307-310.  
武迎春, 曹益平, 钟立俊. 一种改进型 Stoilov 算法相位测量轮廓术[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 307-310.
- [16] 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.
- [17] ZHOU Can-lin, LI Fang. A novel calibration technology in profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 761-764.  
周灿林, 李方. 一种新的形貌检测系统标定技术[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 761-764.
- [18] BROWN M, LOWE D G. Invariant features from interest point groups[C]. *British Machine Vision Conference*, 2002: 656-665.
- [19] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6): 381-395.