

文章编号 1004-924X(2017)增-0297-07

基于三波长相移轮廓术的表面测量降噪

丁明君^{1,2}, 习江涛^{1,2,3}, 李光旭^{1,2*}, 宋丽梅⁴

- (1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;
2. 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;
3. 伍伦贡大学 电气、计算机与通信工程学院, 新南威尔士州 澳大利亚 2522;
4. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387)

摘要:为了改进利用相移轮廓术方法(PSP)对三维物体表面测量时的噪声问题,本文提出了一种基于三波长的相移轮廓术测量方法。首先,在研究等效波长和包裹相位的正问题基础上求解等效波长的相位。其次,推导三个独立光波的相位解卷绕方程。最后,利用相位分析方法去除相位噪声。本研究自行设计了测量系统,分别测量了标定板和复杂三维物体表面形状。与格雷码方法和多波长相移轮廓术方法相比,利用本方法对三维物体表面测量时噪声点减少98.02%,三维重建速度提高了12%。实验及分析结果显示该方法具有更好的鲁棒性和测量精度,并极大地提高了表面测量的噪声抑制能力。

关键词:三维形貌测量;相移轮廓术;降噪;多波长;相位解卷绕

中图分类号:TP394.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0297

Denoising method for shape measurement based on three wavelength phase shift profilometry

DING Ming-jun^{1,2}, XI Jiang-tao^{1,2,3}, LI Guang-xu^{1,2*}, SONG Li-mei⁴

- (1. School of Electronic and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China;
 3. School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, NSW 2522, Australia;
 4. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)
- * Corresponding author, E-mail: liguangxu@tjpu.edu.cn

Abstract: In order to reduce noise points in shape measurement of 3D objects using Phase Shift Profilometry (PSP) methods, a novel Three Wave Length PSP (TWSPSP) method was investigated. Firstly, relevant problems of equivalent wavelength and unwrapped phase were analyzed. Then, the

收稿日期:2017-04-24;修订日期:2017-05-18.

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目(No. 14JCYBJC42300);天津市自然科学基金资助项目(No. 17JCQNJC01400)

solution of unwrapping method for TWSP was derived. Finally, global phase filtering based method was used to reduce the phase noises. The measurement system was designed to measure the calibration target as well as the complicated shape target. Experimental results show that the noisy points of three-dimensional graphics are reduced by 98.02%, and the speed of 3D reconstruction is raised by 12%. The experiment and analysis results show that this system has better robust and higher measurement accuracy, thus the noises in the shape measurement can be suppressed significantly.

Key words: three-dimensional tomography; phase shift profilometry; denoising; multi-wavelengths; phase unwrapping

1 引言

相移轮廓术(Phase Shift Profilometry, PSP)由于具有高速度、高分辨率、高准确度和非接触式等特点在三维形貌测量中得到普及^[1]。然而,三维形状的重建质量经常受到测量噪声的影响。因此,去除测量噪声是提高重建质量的关键。

去除测量噪声的常见方法可分为以下三类:(1)基于离散余弦变换的方法。Yang 等提出了一种三维块匹配去除图像高斯噪声的方法^[2]。Danielyan 等证明了 Block-Matching 3D(BM3D)滤波器可以显著提高双光子荧光图像的质量^[3]。Kang 等考虑到统计特征的自相似性,提出了一种两阶段的 3D 滤波算法来消除图像中的噪声^[4]。然而,这类方法仅考察了局部像素级别的统计特征,未考虑物体形状的全局特征。(2)基于多尺度混合高斯模型的方法。Li 等提出了将概率模型用于多尺度高斯模型的处理方法^[5]。Karthik 等在图像复原方面取得进展,他们利用多尺度离散混合高斯模型方法来实现图像中邻域小波子带的建模^[6]。该算法描述了边缘形状与邻域小波系数的相关性,但不能准确描述局部结构。(3)基于非局部平均的图像降噪方法。吴锡等提出了利用结构张量的非局部平均降噪技术来抑制核磁共振图像中的噪声,进而提高图像中细微组织结构的分辨率^[7]。田萍芳等提出面向 GPU 的非局部平均降噪滤波器并行算法,实现三维超声图像的散斑降低^[8]。陈晓明等提出了一种基于改进的双边信号滤波算法结构^[9]。虞泓波等引入了三维时间-空间非自适应预滤波算法,以提高机载雷达的测量速度^[10]。

本文提出一种基于三波长相移轮廓术(Three Wavelength Phase Shift Profilometry, TWSP)的相位解卷绕算法,以达到扩展测量范

围、降低测量噪声的目的。该方法能保持原始图像信息,具有抗扰能力强以及测量速度快等优点。

2 基于 TWSP 的相位解卷绕方法

设光源波长分别为 λ_1, λ_2 和 λ_3 , 等效波长记作 $\lambda_{12}, \lambda_{23}$ 和 λ_{123} , 等效相位为 θ_{12}, θ_{23} 和 θ_{123} , 它们与原波长的换算关系参考文献^[11]。经解卷绕得出展开后坐标点 (x, y) 处的绝对相位, 分别记作 $\theta_{T1}(x, y), \theta_{T2}(x, y)$ 和 $\theta_{T3}(x, y)$, 则有:

$$\theta_{Ti}(x, y) = \theta_i(x, y) + 2\pi m_i(x, y), \quad (1)$$

其中 $m_i(x, y)$ 为整数, $i=1, 2, 3$ 。假设图像中有 M 个像素, 则等效波长 λ_{123} 满足条件 $\lambda_{123} \geq M$ 。

2.1 波长 λ_{12} 和 λ_{23} 的相位解卷绕方法

波长 λ_{12} 和 λ_{23} 的相位解卷绕方法需要利用 $\theta_{123}(x, y)$ 的绝对值。在像素 $1 \sim W$ 的测量范围中波长 λ_{123} 的相位值 $\theta_{123}(x, y)$ 是 $0 \sim 2\pi$ 的直线。但对于波长 λ_{12} 有 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$ 个周期不连续, 对于波长 λ_{23} 有 $\lambda_{123}/\lambda_{23}$ 个周期不连续, 则对于波长 $\lambda_{12}, \lambda_{123}$ 的相位值可以分成 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$ 个部分, 每个部分的长度为 $2\pi/(\lambda_{123}/\lambda_{12})$ 。对于点 (x, y) 如果 λ_{12} 的包裹相位为 $\theta_{12}(x, y)$ 且 λ_{123} 的相位为 $\theta_{123}(x, y)$, 则有:

$$m(x, y) = \text{Round}(\theta_{123}(x, y)/2\pi/\lambda_{123}/\lambda_{12}). \quad (2)$$

利用公式:

$$\theta_T(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi m(x, y), \quad (3)$$

λ_{12} 的绝对相位值为:

$$\begin{aligned} \theta_{T12}(x, y) &= \theta_{12}(x, y) + 2\pi \text{Round}\left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi/(\lambda_{123}/\lambda_{12})}\right] \\ &= \theta_{12}(x, y) + 2\pi \text{Round}\left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_{12}}\right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中函数 $\text{Round}()$ 代表取整运算; $\theta_{T12}(x, y)$ 是波

长 λ_{12} 的绝对展开相位; $\theta_{12}(x, y)$ 是波长 λ_{12} 的包裹相位, 范围为 $[0, 2\pi]$ 。 λ_{23} 的绝对相位值计算与

λ_{12} 的类似。绝对相位 $\theta_{T23}(x, y)$ 和 $\theta_{23}(x, y)$ 如图 1(a) 所示。

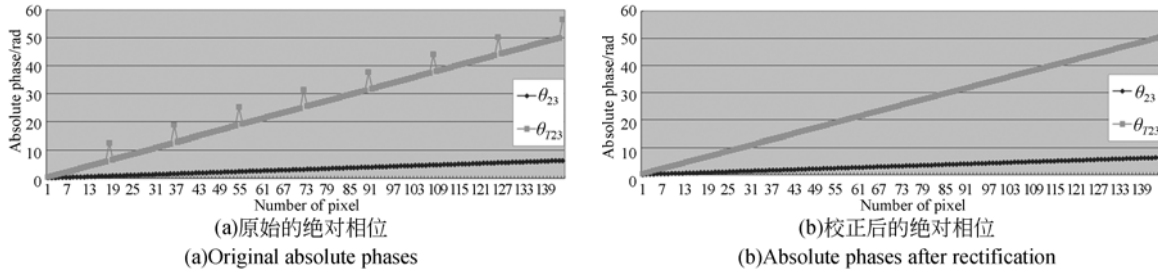


图 1 原始绝对相位和矫正后相位

Fig. 1 Phase comparison before and after rectification

然而, 从图中可以看出周期最后一点的相位不正确, 这是因为如果 $\theta_{123}(x, y) = 2\pi$, 这点将产

生不连续。为了去除这种不连续, 将 $\theta_{T12}(x, y)$ 和 $\theta_{T23}(x, y)$ 的相位解卷绕公式修改为:

$$\theta_{Ti}(x, y) = \begin{cases} \theta_i(x, y) + 2\pi \text{Round} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_i} \right], & \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ \theta_i(x, y) + 2\pi \left[\text{Round} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_i} \right] - 1 \right], & \theta_{123}(x, y) = 2\pi \end{cases}, \quad (5)$$

其中 $i = 12$ 或 23 。经过校正后, 绝对相位 $\theta_{T23}(x, y)$ 和 $\theta_{23}(x, y)$ 如图 1(b) 所示, $\theta_{T23}(x, y)$ 是连续直线。

个周期不连续。对于每个波长 λ_{12} , 波长 λ_1 有 λ_{12}/λ_1 个周期不连续。因此, 对于波长 λ_1 总共有 $(\lambda_{23}/\lambda_{12}) \times (\lambda_{12}/\lambda_1)$ 个 2π 不连续。为去除不连续, $\theta_{Ti}(x, y), i = 1, 2, 3$ 的相位解卷绕公式应修正为:

2.2 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的相位解卷绕方法

类似于 2.1 节所述, 对于波长 λ_{12} , 有 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$

$$\theta_{Ti}(x, y) = \begin{cases} \theta_i(x, y) + 2\pi \left[\text{Round} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Round} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] \right] & \theta_i(x, y) \neq 2\pi \text{ and } \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ \theta_i(x, y) + 2\pi \left[\text{Round} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Round} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] - 1 \right], & \theta_i(x, y) \neq 2\pi \text{ or } \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ \theta_i(x, y) + 2\pi \left[\text{Round} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} - 1 \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Round} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] \right] & \theta_i(x, y) \neq 2\pi \text{ and } \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \end{cases}, \quad (6)$$

其中: 对于 $\theta_{T1}(x, y), i = 1, j = 12$; 对于 $\theta_{T3}(x, y), i = 3, j = 23$; 对于 $\theta_{T2}(x, y)$, 其值可以通过 λ_{12} 和 λ_{23} 计算, 因此 $i = 2, j = 12$ 或 $i = 2, j = 23$ 。校正后 $\theta_{T1}(x, y)$ 和 $\theta_{12}(x, y)$ 的绝对相位中不连续点被移除且 $\theta_{T1}(x, y)$ 为连续直线。

3 相位噪声滤波方法

随机相位噪声是导致相位错误的最大误差源。Zhang 等提出了 4 种相位滤波方法^[12], 并且

指出如果使用长波长条纹图像, 随机噪声显著, 并且滤波确实改善了测量。然而, 较短波长的随机噪声并不显著, 平滑处理将移除很多细节。相位单调性法假定相位递增, 因此任一不满足递增规则的点应视为不正确的展开点。然而, 由于实际中某些噪声也满足递增规则, 该方法不能移除所有噪声。孔洞检测与填充法的缺点在于孔洞的填充, 由于没有 100% 正确的相位解卷绕算法, 有可能在这些区域产生一些不正确点。

为有效消除相位噪声, 本文设计了两种去噪

方法:第一种方法基于展开相位 $\theta_{T_2}(x, y)$;第二种方法基于三个展开相位 $\theta_{T_1}(x, y)$, $\theta_{T_2}(x, y)$ 和 $\theta_{T_3}(x, y)$ 。首先使用第一种方法,因为它对于移除明显噪声点简单有效。然后在此基础上使用第二种方法进一步消除噪声。

3.1 基于展开相位 $\theta_{T_2}(x, y)$ 的相位滤波方法

假设 $\theta_{T_2}(x, y)$ 是由 $\theta_{123}(x, y)$ 和 $\theta_{12}(x, y)$ 计算出的绝对相位, $\theta_{T_{21}}(x, y)$ 是由 $\theta_{123}(x, y)$ 和 $\theta_{23}(x, y)$ 计算出的绝对相位。理论上,两者的值对于一个点应该相同。但实际上,由于它们是由不同信号计算出的,在噪声点处它们可能不同。 $\theta_{T_2}(x, y)$ 和 $\theta_{T_{21}}(x, y)$ 的差为:

$$D_{T_2}(x, y) = \theta_{T_2}(x, y) - \theta_{T_{21}}(x, y), \quad (7)$$

如果 $D_{T_2}(x, y) \neq 0$ 则该点必定为噪声点。

3.2 基于展开相位的相位滤波方法

使用 TWSPSP 方法计算三个绝对展开相位。每个绝对相位可以用于获得基于参考平面^[13-14]或立体视觉方法^[15]的三维坐标。假定 $\theta(x, y)$ 是物体相位图的值, $\theta^p(x, y)$ 是通过测量均匀平坦表面得到的参考相位图的值。表面相对于参考平面的高度 ΔZ 和相位差之间的关系为:

$$\Delta\theta(x, y) = \theta(x, y) - \theta^p(x, y). \quad (8)$$

ΔZ 与 $\Delta\theta$ 近似成正比,即:

$$\Delta Z \propto \Delta\theta(x, y) = \theta(x, y) - \theta^p(x, y). \quad (9)$$

假定参考平面有深度 $Z_{rp}(x, y) = 0$, 对于每个相机像素,绝对深度 $Z(x, y)$ 可以计算为:

$$Z(x, y) = Z_{rp}(x, y) + \Delta Z = c_0 [\theta(x, y) - \theta^p(x, y)], \quad (10)$$

其中 c_0 为常数,可以通过校准来确定。

由于使用 TWSPSP 方法计算 3 个对应于 λ_1 , λ_2 , λ_3 的绝对展开相位,可以得到 3 个绝对深度值 $Z_1(x, y)$, $Z_2(x, y)$ 和 $Z_3(x, y)$, 即:

$$\begin{cases} Z_1(x, y) = c_0 [\theta_{T_1}(x, y) - \theta_1^p(x, y)] \\ Z_2(x, y) = c_0 [\theta_{T_2}(x, y) - \theta_2^p(x, y)] \\ Z_3(x, y) = c_0 [\theta_{T_3}(x, y) - \theta_3^p(x, y)] \end{cases} \quad (11)$$

如果 $Z_1(x, y)$, $Z_2(x, y)$ 和 $Z_3(x, y)$ 在校准精度后仍有微小差异,则该点测量正确;否则视为噪声点。校准精度由测量距离确定。短距测量得到高校准精度。例如,假定校准精度为 0.1 mm,如果 $Z_1(x, y)$, $Z_2(x, y)$ 和 $Z_3(x, y)$ 的差别小于 0.1 mm,则该点为正确点。对于正确点,最终的 $Z(x, y)$ 应为:

$$Z(x, y) = \frac{1}{3} [Z_1(x, y) + Z_2(x, y) + Z_3(x, y)]. \quad (12)$$

4 实 验

4.1 实验条件

本文设计的基于 TWSPSP 的实时绝对对三维形状测量系统如图 2 所示。使用两台 CCD 相机,可以从不同视角获取 3D 形状。一台数字光处理 (Digital Light Processor, DLP) 投影仪放置于中央,分辨率为 800×600 。CCD 相机为数字相机,图像分辨率为 1280×1024 。实验选取的投影波长分别为 $\lambda_1 = 16$, $\lambda_2 = 18$, $\lambda_3 = 21$ 。



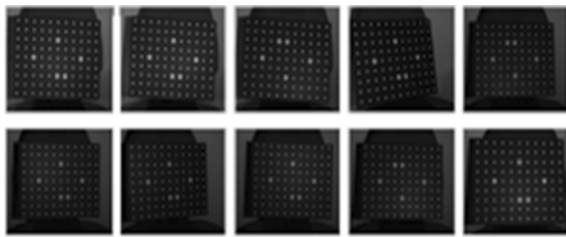
图 2 设计的 3D 形状测量系统

Fig. 2 Photo of proposed 3D shape measurement system

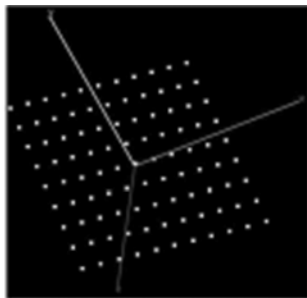
4.2 测量精度实验

为测试提出方法的精度,使用放置在 10 个不同位置的校准目标进行测量,如图 3(a) 所示。校准目标上有 99 个圆,圆的中心精确加工。使用本文的三维重建方法计算圆中心的 3D 数据,结果如图 3(b) 所示。假定两个相邻圆之间的标准距离为水平方向 D_H ,垂直方向 D_V ,如图 3(c) 所示。本实验中,标定板由 9 行 11 列构成,总共 $90D_H$ 和 $88D_V$ 。测量精度可以表示为标准距离值与测量值之间的平均差别。精度评价公式为:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{90} (|x_i - D_H|/90) + \sum_{j=1}^{88} (|x_j - D_V|/88)}{2}, \quad (13)$$



(a)放置在10个不同位置的标定目标
(a)Calibration target placed at 10 different positions



(b)圆中心的3D检测数据
(b)3D data of circle center

图 3 标定板测试

Fig. 3 Three-dimensional measurements of calibration target

其中 e 是为标准值的偏差, x_i 是两个相邻圆之间水平方向上的测量值, x_j 是垂直方向, D_H 和 D_V 分别是水平方向和垂直方向的标准值, 90 和 88 分别是 D_H 和 D_V 的数量。

这里估计了 10 个位置的标准偏差, 并比较了本文方法与多波长相移轮廓术方法 (MWPS) 、格雷码方法的测试结果, 结果如表 1 所示, 三种方法的处理速度分别为 3.08, 5.12 和 2.03 s。

4.3 滤波实验

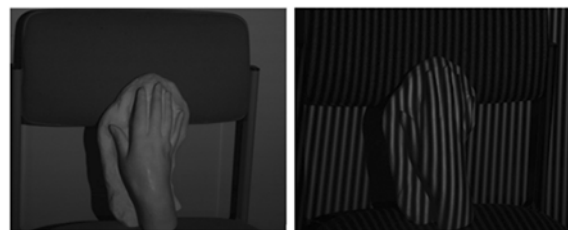
我们测试了一张手拿抹布的图像, 如图 4(a) 所示, 其条纹图见图 4(b)。利用条纹图恢复其三维形状, 结果如图 4(c) 所示。图 4(d) 为利用 TWSPS 进行滤波后的重建结果, 可以明显看出, 经全局滤波后图像中的噪声点得到很大抑制。

为量化 TWSPS 的噪声抑制结果, 分别统计了滤波前后重建图像中噪声点的平均个数以及重建速度, 结果如表 2 所示。可以看出, 噪声点得到明显抑制, 测量速度也有很大提高。

表 1 三种方法精度和比较

Tab. 1 Accuracy comparison between three methods

(mm)			
偏差	MWPS 方法	格雷码方法	TWSPS
e_1	0.0213	0.0312	0.0176
e_2	0.0232	0.0319	0.0179
e_3	0.0227	0.0314	0.0181
e_4	0.0228	0.0321	0.0184
e_5	0.0232	0.0324	0.0183
e_6	0.0227	0.0327	0.0177
e_7	0.0224	0.0331	0.0181
e_8	0.0235	0.0329	0.0182
e_9	0.0231	0.0311	0.0178
e_{10}	0.0233	0.0312	0.0179
Precision	0.023	0.032	0.018



(a)待测量图片
(a)Fingerprint to be measured
(b)波长为 λ_1 时的条纹图
(b)Fringe image under λ_1



(c)未经过滤波后的重构图
(c)3D reconstruction result without global phase filter
(d)全局相位滤波后重构图
(d)3D reconstruction result after global phase filter

图 4 实验图像与三维重建结果

Fig. 4 Experiment image and 3D reconstruction results

表 2 三维重建结果比较

Tab. 2 Comparison of 3D reconstruction results

	噪声点数	测量速度/s
无全局相位滤波	958	1.53
有全局相位滤波	19	0.98

5 结 论

本文提出了一种基于 TWPSF 的表面重建和去噪方法。该方法具有噪声低、速度快、适应性强及相位解卷绕算法稳定等优点,因为测量按照逐像素进行,因此可以用于任意阶跃高度的高精度测量。本方法仅使用 3 个短波长相位,利用等效

的较长波长作为参考得到 3 个短波长的绝对相位,这是一种全局相位法,可以抑制噪声点,抗干扰性较强。与格雷码方法和多波长相移轮廓术方法相比,本方法测量三维物体表面时噪声点减少了 98.02%,三维重建速度提高了 12%;而且需要获得的图像数量少于其他多波长方法,因此测量速度高。本方法适用于不同光照下不同颜色物体的三维测量,且不需要人工设定阈值。

参考文献:

- [1] ZUO CH, HUANG L, ZHANG ML, *et al.*. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [2] YANG J, JIA ZH, QIN X Z, *et al.*. 3D image denoising based on shape-adaptive principal component analysis[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(3): 241-244.
- [3] DANIELYAN A, WU Y W, SHIH P Y, *et al.*. Denoising of two-photon fluorescence images with block-matching 3D filtering[J]. *Methods*, 2014, 68(2): 308-316.
- [4] KANG C Q, CAO W Q, HUA L, *et al.*. Infrared image denoising algorithm via two-stage 3D filtering [J]. *Laser Infrared*, 2013, 43(3): 261-264.
- [5] LI M, GHOSAL S. Bayesian multiscale smoothing of Gaussian noised images[J]. *Bayesian Analysis*, 2014, 9(3): 733-758.
- [6] KARTHIK B, KIRAN K TVU. Noise removal using mixtures of projected Gaussian scale mixtures [J]. *World Applied Sciences Journal*, 2014, 29(8): 1039-1045.
- [7] 吴锡,何晋,朱明. 综合多梯度磁场方向弥散加权磁共振图像线性最小均方误差去噪[J]. *生物医学工程学杂志*, 2014, 31(1): 7-12.
- WU X, HE J, ZHU M. DWI LMMSE denoising using multiple magnitude directions[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2014, 31(1): 7-12. (in Chinese)
- [8] 田萍芳,祝中华,陈英. 一种基于 GPU 的并行三维各向异性扩散的超声图像斑点噪声滤波算法[J]. *武汉大学学报:理学版*, 2015, 61(4): 393-397.
- TIAN P F, ZHU ZH H, CHEN Y. A GPU-based parallel speckle reducing anisotropic diffusion algorithm for 3D ultrasound images [J]. *J. Wuhan Univ.: Nat. Sci. Ed.*, 2015, 61(4): 393-397. (in Chinese)
- [9] 王亚琪,陈成军,李希彬,等. 基于 Kinect 的轴类零件三维重建研究[J]. *计算技术与自动化*, 2015, 34(4): 126-131.
- WANG Y Q, CHEN CH J, LI X B, *et al.*. Research on Kinect-based 3D reconstruction of shaft-type parts[J]. *Computing Technology and Automation*, 2015, 34(4): 126-131. (in Chinese)
- [10] 虞泓波,冯大政,曹杨,等. 机载雷达空时三维非自适应预滤波方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(1): 215-219.
- YU H B, FENG D ZH, CAO Y, *et al.*. Three-dimensional space-time nonadaptive pre-filtering approach in airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 215-219. (in Chinese)
- [11] SONG L M, CHANG Y L, XI J T, *et al.*. Phase unwrapping method based on multiple fringe patterns without use of equivalent wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 213-224.
- [12] JIANG C, BELL T, ZHANG S. High dynamic range real-time 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7337-7346.
- [13] ZHANG S, YAU S T. High-resolution, real-time 3d absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Optics Express*, 2006, 45: 2644-2649.
- [14] WANG Y J, ZHANG S. OLIVER J H. 3D shape

measurement technique for multiple rapidly moving objects[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8539-8545.

[15] SONG L M, WANG M P, HUANG L L, *et al.*.

High precision camera calibration in vision measurement[J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(10): 1413-1420.

作者简介:



丁明君(1982—),男,天津人,讲师,2005年、2010年于天津工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事信号与信息处理、三维光学测量方面的研究。E-mail: dingmingjun@tjpu.edu.cn



习江涛(1962—),男,河南宜阳人,教授,博士生导师,1982年于北京理工大学(原北京工业学院)获得学士学位,1985年于清华大学获得硕士学位,1995年于澳大利亚伍伦贡大学获得博士学位,主要从事信号与信息处理、三维光学测量方面的研究。E-mail: jiangtao@uow.edu.au

通讯作者:



李光旭(1983—),男,辽宁人,博士,讲师,2006年、2009年于辽宁工业大学分别获得学士、硕士学位,2013年于日本九州工业大学获得博士学位,主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: liguangxu@tjpu.edu.cn



宋丽梅(1976—),女,河北秦皇岛人,教授,1999年、2001年和2004年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事计算机视觉、三维光学测量、逆向工程和模式识别方面的研究。E-mail: songlimei@tjpu.edu.cn