

基于投影栅相位法和独立分量分析的强反射表面形貌测量

张翼翔, 张连新*

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 提出了一种结合独立分量分析(ICA)算法的投影栅相位法,用于实现强反射表面三维形貌的测量。分析了强反射表面的反射光(主要由镜面反射光以及漫反射光组成)的模型及其特点。针对镜面反射光的偏振特性,通过在 CCD 摄像机镜头前加装偏振片,可以对镜面反射光进行初步的滤除。同时旋转偏振片,以获得不同角度下的偏振图像。利用反射光模型并结合独立分量分析算法,将镜面反射光分量以及漫反射光分量进行分离。最后使用漫反射光分量图像对物体进行三维重建。实测了一块表面光滑的铝合金工件,验证了该方法的可行性。

关键词 测量; 投影栅相位法; 独立分量分析; 强反射表面

中图分类号 TB92; O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051201

Profile Measurement of High-Reflective Surface Based on Projected Fringe Profilometry and Independent Component Analysis

Zhang Yixiang, Zhang Lianxin*

Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A method that combines projected fringe profilometry with independent component analysis (ICA) is proposed to realize the three-dimensional profile measurement of high-reflective surfaces. The reflection model and characteristics of reflection light from high-reflective surfaces are analyzed. The reflection light is mainly composed of specular and diffuse components. Considering the polarization property of the specular light, we put a polarizer before the CCD camera to eliminate the specular light primarily. Then, the polarization images at different angles can be captured by rotating the polarizer, and the separation of specular and diffuse components can be realized by using the reflection model combined with ICA. Finally, the images of diffuse components can be applied to the three-dimensional reconstruction. A smooth aluminum alloy sheet is measured, and the feasibility of the proposed method is verified.

Key words measurement; projected fringe profilometry; independent component analysis; high-reflective surface

OCIS codes 120.5050; 120.2650

1 引言

投影栅相位法作为一种常见的非接触式光学三维面型测量技术,因其高分辨率、无破坏、数据获取速度快等优点被广泛应用于在线测量、医疗卫生和工业现场等^[1-3]。投影栅相位法的主要测量步骤包括光栅投影、相位获取、相位解包裹和三维重建等。

光栅投影是通过使用投影设备,将含有一定规律的光栅投射到被测物体表面上。相位获取是通过计算得到受物体表面调制的光栅条纹包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 区间的解调相位,常用的方法有傅里叶轮廓术和相移法。相位解包裹是利用相位解包裹算法将上一步获得的包裹相位展开并还原成物体表面真实连续的相位。三维重建则是利用相位-高度公

收稿日期: 2019-07-29; 修回日期: 2019-08-12; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 国防科学技术预先研究基金

* E-mail: lianxinzhang@caep.cn

式计算物体的表面形貌。

但是,在获取被测物体表面数据的过程中,往往认为物体表面是朗伯体,仅考虑其漫反射^[4]。然而实际情况下大部分物体表面均是非朗伯体,这就意味着物体表面反射既包含漫反射分量,又包含镜面反射分量,这种现象在强反射表面物体上表现得尤为明显。但是镜面反射会使图像饱和或过暗,产生信息失真,导致测量精度大幅下降,甚至难以进行正常测量。

针对这一问题,国内外学者提出了不同的解决方案。最简单的方法是在强反射物体表面涂覆一层消光剂,使物体表面呈现漫反射特性,但是消光剂往往无法均匀涂覆在物体表面上,使得测量精度大幅下降。Umeyama等^[5]提出一种在照相机镜头前加装偏振片的方法,利用镜面反射光和漫反射光偏振特性的不同,使镜面反射分量得以滤除,并使漫反射分量进入观测相机,但该方法没有考虑偏振片对测量精度造成的影响。Bothe等^[6]针对镜面反射物体的测量提出一种条纹反射术,即相机与有一定规律的条纹位于同一侧,通过镜面反射物体将条纹反射到相机上,形成条纹与镜面物体表面的叠加,该方法可实现较高的分辨率,但对条纹的位置以及准确度有很高要求。姜宏志等^[7]提出一种向物体分别投射亮暗条纹并结合不同曝光时间来进行拍摄的方法,然后将多组照片进行合成,最终得到物体的相位信息,这种方法解决了反射光亮度范围与相机动态范围的不一致问题,但是这种方法过程繁琐,对条纹亮度的要求比较严格。刘元坤等^[8]利用水平和垂直两个方向的光栅相位对类镜面物体进行测量,然后通过计算得到梯度分布并对待测反射镜进行重建,该方法成本低、结构简单且灵活性低,但测量精度较低。李兆杰等^[9]提出了一种基于自动多次曝光的面结构光测量方法,利用相机响应曲线和不同曝光时间下的图像计算出当前场景测量所需的曝光次数和曝光时间,将具有不同曝光时间的图像序列融合成新的条纹图像序列进行重建,但该方法较为繁琐。刘飞等^[10]通过投射区域格雷编码灰度图来计算饱和和区域的位置,并增加过渡补偿区域,平滑降低饱和区域的条纹光栅投射强度,从而提高表面高反物体的三维重建质量。白景湘等^[11]提出了一种基于灰度互补关系的重叠相移光栅分离方法,该方法通过调整投影的相移光栅的时间及次序,在不改变原有测量系统结构的基础上有效消除了重叠部分的干扰信号。总而言之,目前对于强反射表面三维形貌测

量的问题还需要探索更多的方法。

本文在传统的投影栅相位法的基础上,利用镜面反射光的偏振特性,并结合信号处理领域的一种算法——独立分量分析(ICA)算法改为^[12],实现了强反射表面的三维形貌测量。

2 基本原理

2.1 系统组成

测量装置如图1所示。本文采用传统的交叉光轴单目相机系统进行测量,即投影系统和摄像系统光心的连线与参考平面平行,摄像机光轴与投影系统光轴相交。同时在CCD相机前加一个偏振装置,并对其进行旋转,以获得不同旋转角度下的偏振图像。

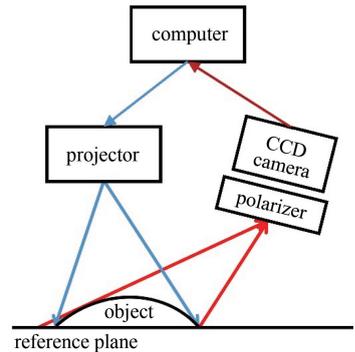


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2.2 相位解算

将正弦光栅分别投影到参考平面以及被测物体上,利用相位求解方法,获得两者的包裹相位。相移法因具有对噪声的变化以及背景光不敏感等优点而被广泛地使用^[13]。四步相移法是对正弦光栅分四次进行投影,相邻两幅光栅间的相位差为 $\pi/2$,则四幅条纹图像在坐标 (x, y) 处的灰度值 $I_n(x, y)$ ($n=0, 1, 2, 3$)分别为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + n \times \pi/2], \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$ 为背景光强度; $b(x, y)$ 为被测物体表面的反射率; $\phi(x, y)$ 为需要解调的包裹相位; n 为相移次数。则四步相移法的相位解调公式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_2(x, y) - I_0(x, y)}. \quad (2)$$

分别得到参考光栅和变形调制光栅的包裹相位后,再利用解包裹算法获得各自的连续真实相位。常用的解包裹算法有最小二乘法、枝切法、质量图导向法等。

2.3 反射模型

通常物体表面的反射光由两部分组成:漫反射光和镜面反射光,见图2。漫反射光又称漫反射波瓣,表示物体内部的散射,并沿着表面法线方向均匀分布;镜面反射光包括镜面反射波尖和镜面反射波瓣两部分,其中,镜面反射波瓣为镜面反射中的漫反射成分,镜面反射波尖指镜面反射光。反射光各个分量所占的比重并不相同。

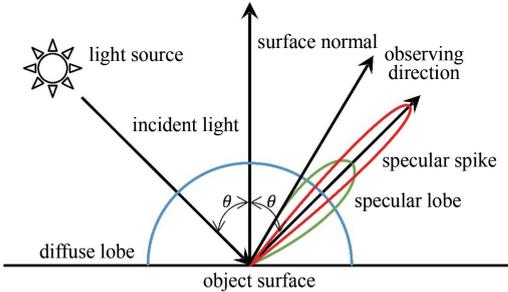


图2 物体表面反射模型

Fig. 2 Reflection model of object surface

对于强反射表面,镜面反射波尖占优势,此时反射光的能量集中于镜面反射方向,具有极强的方向性^[14]。当从不同的方向观测物体时,观察到的亮度也不尽相同,此时,利用相机可观测到从漫反射波瓣到镜面反射波尖的不同亮度的全部反射光。但强反射表面的反射光亮度差距很大,而一般相机的感光元件动态范围是有限的,拍摄到的图像不同部分的饱和程度也不一样,无法反映反射条纹真实的情况,使利用(2)式计算得到的相位值不准确。

由图2的模型可知,镜面反射的观测强度与观测方向高度相关,这正是因为镜面反射属于偏振度较大的部分偏振光。而当入射角为布儒斯特角时,镜面反射光为完全偏振光。而漫反射光虽然也属于部分偏振光,但其偏振度很小,其亮度表现为各向同性,故与观测方向无关。

2.4 加入偏振器件后的光强

偏振片具有二向色性(即各向同性的介质在受到外界作用时会产生各向异性,它们对光的吸收本领也随着光矢量的方向而改变),其往往被用于产生偏振光。反之,当通过旋转的偏振片观察物体时,发现物体的光强会随着旋转角度的变化而变化,如图3所示。可以看出,光强随偏振片角度呈正弦曲线变化。漫反射分量因具有各向同性,其亮度不随偏振片旋转角度的变化而变化,大致为某一常数;而镜面反射分量因具有高度偏振特性,其亮度随偏振片旋转角度呈正弦规律变化。

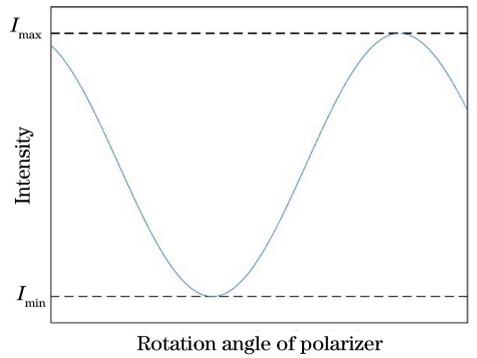


图3 光强随偏振片旋转角度的变化关系图

Fig. 3 Relationship between intensity and rotation angle of polarizer

进一步假设漫反射光是完全非偏振光,本文采用的投影方法为远心光栅投影,故可以认为从光源发出的入射光是平行光。透过偏振光观察到的物体的光强可以近似表达为

$$I = I_d + f(\psi)I_s, \quad (3)$$

式中: I_d 和 I_s 分别代表反射光中漫反射分量的光强以及镜面反射分量的光强; $f(\psi)$ 为一个与偏振片旋转角度 ψ 有关的系数。

3 使用ICA算法进行分离

3.1 ICA算法的基本步骤

由之前的讨论可知,透过偏振片观察到的反射光强是 I_d 和 I_s 的线性组合。系数 $f(\psi)$ 与偏振片的旋转角度以及相机的观察角度相关,若其中有任一量无法测得,则系数未知。因此,要在漫反射分量、镜面反射分量、系数未知的情况下,将漫反射与镜面反射从混合反射中分离,这种情况可以用ICA来解决。

ICA是一种常见于信号处理领域的数据分析方法,主要应用于语音信号分离以及脑电信号分析。顾名思义,ICA的含义是将混合信号中的独立分量分离出来,尤其是在混合方式未知的情况下,ICA可将概率独立源信号从混合信号中恢复出来。ICA的主要步骤如图4所示。

首先使相互独立的源信号 s 通过混合系统 A ,得到混合信号 x ,即 $x = As$;然后使混合信号 x 通过解混系统 B ,得到输出信号 y ,即 $y = Bx$,同时输出信号 y 会尽可能地逼近 s ,但允许两者中的各分量顺序以及比例不同。解混过程中往往先对混合信号 x 进行球化处理,即经线性变化 $z = Wx$ 后使中间变量 z 中的各分量正交且归一,以便于后续处理。

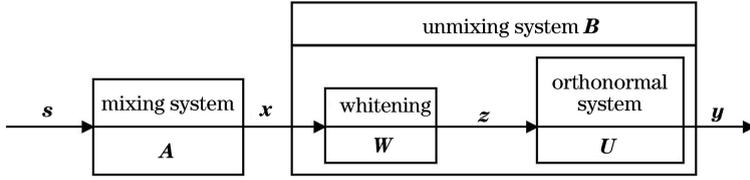


图 4 ICA 的主要步骤

Fig. 4 Main procedure of ICA

当假设漫反射分量和镜面反射分量概率独立时,可使用 ICA 算法将其分离。同时所需要的混合信号数目需要大于等于源信号的数目,这可以通过旋转偏振片来实现。假设通过旋转偏振片获取了 N 张反射图像,得到的混合信号为

$$\mathbf{I}_{\text{mix}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{mix},1} \\ \mathbf{I}_{\text{mix},2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{\text{mix},N} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{I}_{\text{mix},i}$ 为行向量。令 \mathbf{I}_{dif} 和 \mathbf{I}_{spe} 分别代表漫反射以及镜面反射行向量,则源信号 \mathbf{I}_{sig} 可以表示为

$$\mathbf{I}_{\text{sig}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{dif}} \\ \mathbf{I}_{\text{spe}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由此可得

$$\mathbf{I}_{\text{mix}} = \mathbf{A}\mathbf{I}_{\text{sig}}. \quad (6)$$

3.2 采用负熵的固定点 ICA 算法

首先介绍一下几个概念:

1) 高阶统计量。 n 阶矩的定义为

$$m_n = \int x^n p(x) dx = E(x^n), \quad (7)$$

常用的有一阶矩均值以及二阶矩均方。

2) 负熵。熵是信号中所含有的平均信息量,而衡量两个概率密度函数间的相似程度可以用 KL (Kullback-Leibler) 熵表示,即

$$\text{KL}[p(x), q(x)] = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx, \quad (8)$$

式中: $p(x)$ 、 $q(x)$ 是 x 的两种概率密度函数。当 (8) 式中的 $q(x)$ 为高斯分布 $p_G(x)$ 且与 $p(x)$ 具有相同协方差矩阵时,两者间的 KL 熵称为负熵,记作 $J(x)$ 。

固定点算法也称作固定点迭代,常用牛顿迭代法来进行计算,如图 5 所示。其中点 B 坐标为 $(x_k, 0)$,点 A 为过点 $(x_k, f(x_k))$ 的切点,点 C 为切线与 x 轴的交点,即 x_{k+1} 点,迭代过程可以表示为

$$g(x_k) = x_{k+1} = x_k - \overline{BC} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \quad (9)$$

式中: $f'(x_k)$ 为 x_k 点处切线斜率。采用负熵为判

据时,由图 4 可得

$$\Delta \mathbf{u}_i \propto \frac{\partial J(y_i)}{\partial \mathbf{u}_i} =$$

$$\{E[F(y_i)] - E[F(v)]\}E[\mathbf{z}f(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})], \quad (10)$$

式中: \mathbf{u}_i 为正交矩阵 \mathbf{u} 的第 i 行; $\Delta \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i(k+1) - \mathbf{u}_i(k)$,其中 k 代表迭代次数; y_i 为输出信号 \mathbf{y} 的第 i 个分量; $F(\cdot)$ 为非线性函数; $f(\cdot)$ 为 $F(\cdot)$ 的导数; v 服从均值为 0、方差为 1 的正态分布。进入稳态时 $\Delta \mathbf{u}_i = 0$,固定点迭代式为

$$\mathbf{u}_i(k+1) = E\{\mathbf{z}f[\mathbf{u}_i^T(k)\mathbf{z}]\}. \quad (11)$$

由牛顿迭代法经过等效可得

$$G(\mathbf{u}_i) = E[f(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})] + \beta \mathbf{u}_i = 0, \quad (12)$$

式中: $G(\mathbf{u}_i)$ 代表与 \mathbf{u}_i 有关的等效非线性函数,与 $F(\cdot)$ 类似; β 是与 \mathbf{u}_i 和 \mathbf{z} 有关的优化系数。结合 (9)~(12) 式可得

$$\mathbf{u}_i(k+1) = \mathbf{u}_i(k) - \frac{G[\mathbf{u}_i(k)]}{G'[\mathbf{u}_i(k)]}, \quad (13)$$

$$G'[\mathbf{u}_i(k)] = \frac{\partial G(\mathbf{u}_i)}{\partial \mathbf{u}_i} = E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^T f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})\} + \beta. \quad (14)$$

由于 \mathbf{z} 是球化数据,即 $\mathbf{z}\mathbf{z}^T = \mathbf{I}$,故有如下近似关系:

$$E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^T f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})\} \approx$$

$$E[\mathbf{z}\mathbf{z}^T]E[f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})] = E[f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})]. \quad (15)$$

通过合并以及简化 (13)~(15) 式可以得到固定点算法为

$$\mathbf{u}_i(k+1) = E\{\mathbf{z}f[\mathbf{u}_i^T(k)\mathbf{z}]\} - E[f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})]\mathbf{u}_i(k), \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_i(k+1) = \frac{\mathbf{u}_i(k+1)}{\|\mathbf{u}_i(k+1)\|_2}. \quad (17)$$

综上,采用负熵的固定点算法步骤为:1) 将 \mathbf{x} 球化为 \mathbf{z} ; 2) 任意选择 \mathbf{u}_i 的初始值 $\mathbf{u}_i(0)$ 且 $\|\mathbf{u}_i(0)\|_2 = 1$; 3) 令 $\mathbf{u}_i(k+1) = E\{\mathbf{z}f[\mathbf{u}_i^T(k)\mathbf{z}]\} - E[f'(\mathbf{u}_i^T \mathbf{z})]\mathbf{u}_i(k)$; 4) 归一化: $\frac{\mathbf{u}_i(k+1)}{\|\mathbf{u}_i(k+1)\|_2} = \mathbf{u}_i(k+1)$; 5) 若结果未收敛则返回步骤 3)。

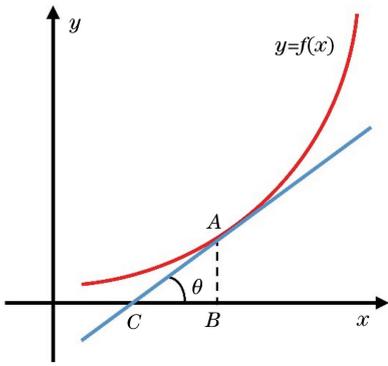


图 5 牛顿迭代法

Fig. 5 Newton iteration algorithm

4 实验与分析

实验的流程如图 6 所示。实验中选用一个表面光滑的铝合金圆柱工件作为被测物体,并采用 Zhang^[15]提出的基于平面方格点的摄像机标定方法,分别对摄像机以及加装偏振片后的摄像机进行标定,然后将正弦光栅分别投射到参考平面和被测物体上,将偏振片置于 CCD 相机前进行拍摄。

下面以相移为 0 时的变形条纹图进行对比和说明。图 7 为不加偏振片时直接拍摄的变形条纹图,可以明显地看出工件的中间部位反光现象强烈,无法用于后续的相位计算。图 8 为在镜头前加上偏振片并旋转 3 种不同角度(分别为 20°、40°和 60°)后所拍摄的变形条纹图。与图 7 对比,图 8 中镜面反射分量得到了一定程度的滤除。

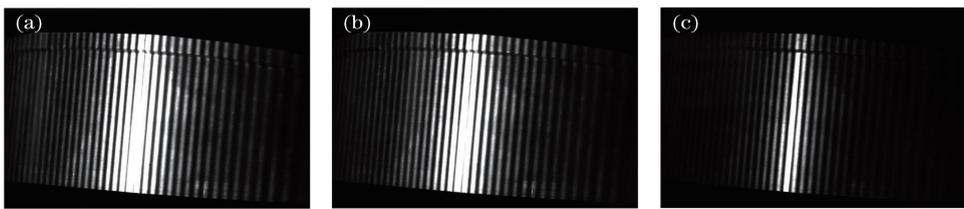


图 8 不同旋转角度下的偏振图像。(a) 20°下的偏振图像;(b) 40°下的偏振图像;(c) 60°下的偏振图像

Fig. 8 Polarization images at different rotation angles. (a) Polarization image at 20°; (b) polarization image at 40°; (c) polarization image at 60°

然后使用 ICA 算法对图像进行处理。由图 9 可以看出,镜面反射分量和漫反射分量得到了较好地分离。对其余变形条纹图像进行同样的处理,将四步相移分别对应的四幅漫反射分量图像进行相位解包裹以及三维重建,并传统投影栅相位法的结果进行对比。图 10 为传统投影栅相位法重建后的结果,经统计有 15.6%的数据无法用于测量。图 11 为使用 ICA 算法重建后的结果,经统计有 0.9%的数据无法用于测量。从实验结果来看,使用 ICA 算

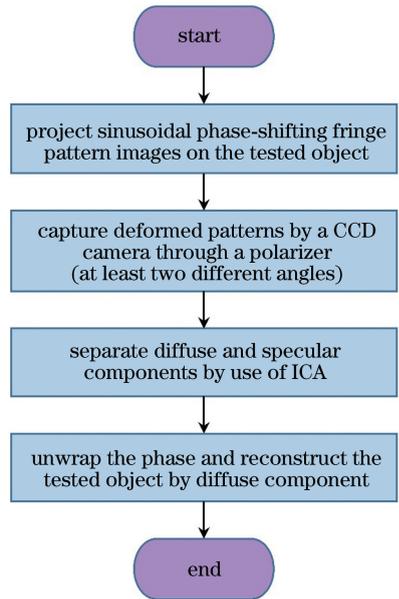


图 6 实验流程图

Fig. 6 Flow chart of experiment

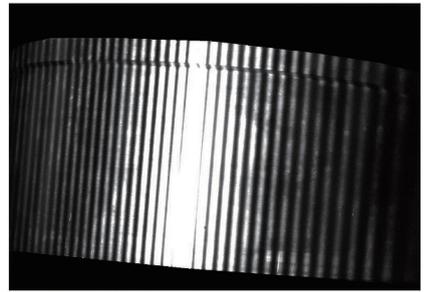


图 7 失真条纹图像

Fig. 7 Distortion fringe image

法可以有效地解决传统测量方法中数据失效的问题。同时将有效数据点进行拟合,并与实测的数据进行对比,得到的结果如表 1 所示,发现使用 ICA 算法后的拟合结果优于传统方法,其误差是传统方法的一半。

5 结 论

针对强反射表面形貌难以测量的现状,对物体表面模型进行分析,得知物体反射光主要包含镜面

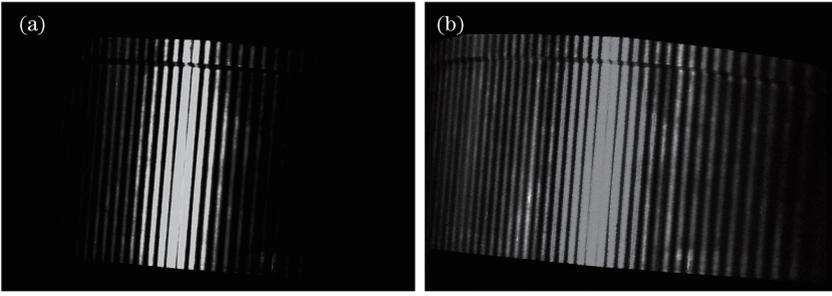


图 9 使用 ICA 算法后分离出的图像。(a)镜面反射分量;(b)漫反射分量

Fig. 9 Separation images using ICA. (a) Specular components; (b) diffuse components

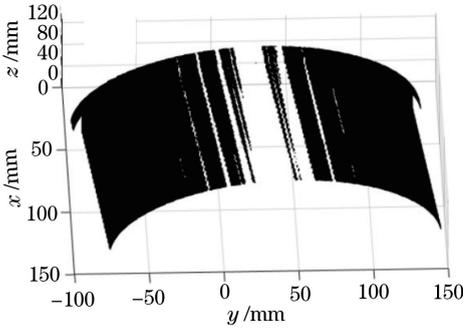


图 10 传统投影栅相位法重建结果

Fig. 10 Reconstructed result of traditional projected fringe profilometry

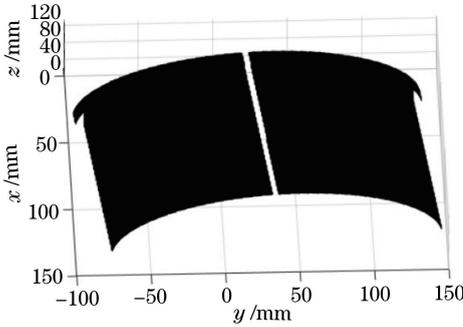


图 11 使用 ICA 算法重建的结果

Fig. 11 Reconstructed result of ICA algorithm

表 1 两种方法所得有效数据拟合结果

Table 1 Fitting results of valid data obtained by two methods mm

| Condition | | Traditional method | ICA |
|----------------|---------------|--------------------|--------|
| Radius size | Actual length | | |
| Larger radius | 126.18 | 126.59 | 126.39 |
| Smaller radius | 123.94 | 124.32 | 124.12 |

反射分量和漫反射分量,而在测量过程中往往仅需漫反射分量,故需要将镜面反射分量滤除。漫反射分量和镜面反射分量相互独立,这种情况正适合使用 ICA 算法将镜面反射分量滤除。利用偏振片的偏振特性获取不同强度的偏振图像,然后结合 ICA

算法便可将镜面反射分量滤除。

实验证明,使用 ICA 算法可以将无效数据点从 15.6% 降至 0.9%,有效地解决了传统测量方法中数据失效的问题;同时使用 ICA 算法后拟合数据的误差较传统方法减小了一半,精度上也有所提升。ICA 算法较好地实现了强反射表面的三维形貌测量。

参 考 文 献

[1] Zhang D. Research and implementation of the 3D reconstruction based on surface structured light method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
张东. 基于面结构光的物体表面三维重建方法研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[2] Wang X. Research on 3D reconstruction using digital fringe projection techniques [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
王曦. 基于数字光栅投影结构光的三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[3] Sun K. Research on 3D grating measurement based on adaptive grating pitch [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
孙奎. 基于自适应节距的三维光栅测量研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.

[4] Zhao Y Q, Song L, Cheng Y M. Specular separation on polarized image fusion [C] // Conference proceedings of Beijing graphic society. Beijing: China Society of Image and Graphics, 2010: 193-197.
赵永强, 宋琳, 程永梅. 基于偏振图像融合的镜面反射分量分离[C] // 北京图象图形学学会会议论文集. 北京: 中国图象图形学学会, 2010: 193-197.

[5] Umeyama S, Godin G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine

- Intelligence, 2004, 26(5): 639-647.
- [6] Bothe T, Li W S, von Kopylow C, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5457: 411-422.
- [7] Jiang H Z, Zhao H J, Li X D, et al. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2002-2008.
姜宏志, 赵慧洁, 李旭东, 等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2002-2008.
- [8] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1636-1640.
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1636-1640.
- [9] Li Z J, Cui H H, Liu C Y, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112004.
李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112004.
- [10] Liu F, He C Q, Shen A M, et al. Optimized compensation method of divisional projection for saturated region of structured light [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612001.
刘飞, 何春桥, 申爱民, 等. 结构光饱和和区域分区投射优化补偿方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612001.
- [11] Bai J X, Qu X H, Feng W, et al. Separation method of overlapping phase-shift gratings in three-dimensional measurement of double projection structured light [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1112002.
白景湘, 曲兴华, 冯维, 等. 双投影结构光三维测量中重叠相移光栅的分离方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112002.
- [12] Zhao B Y. High accuracy surface structured light projection three dimensional measurement research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015,
赵必玉. 高精度面结构光三维测量方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [13] Gao Y. Study on the key technologies of polarization 3D imaging using diffuse reflection [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
高鹰. 漫反射偏振三维成像关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [14] Yang F S, Hong B. Principles and applications of independent component analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
杨福生, 洪波. 独立分量分析的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [15] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.