

文章编号 1004-924X(2011)09-2138-08

粗糙金属表面光条中心提取方法

赵博华*, 王伯雄, 张 金, 罗秀芝

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为了精确提取粗糙金属表面的光条中心,提出了一种基于光切法的光刀条纹中心提取方法。从图像形态学角度出发,分析了图像的噪声来源,利用图像增强处理将噪声转化成颗粒状形态,并保持有效光条的连续条纹状特征。然后,通过对图像连通区域面积计数,分割噪声和有效光条信息,将得到的二值化光条图像作为掩模板,与原图像相乘来复原光条图像的灰度信息。最后,应用灰度重心法对已去噪的光条灰度图像进行中心提取。实验结果表明,提出的方法可使提取的光条中心全部落在光条位置区域。对噪声较多的直线条纹区域进行的中心提取显示,此方法的平均误差为0.337 5个像素。

关键词:光切法;光条中心提取;粗糙金属表面;重心法

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2138

Extraction of laser stripe center on rough metal surface

ZHAO Bo-hua*, WANG Bo-xiong, ZHANG Jin, Luo Xiu-zhi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: zbh07@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: To extract the laser stripe center of a rough metal surface accurately, an extraction method based on light cutting was presented. Firstly, the noise source of an image was analyzed by the image morphology, then the noise was converted into a granular shape while the continuous feature of an effective laser-stripe was still kept through an image enhancement processing. The noise and the laser-stripe were segmented by counting the connected areas of the image, and the denoised binary laser-stripe image was taken as a mask to be multiplied by the original image to recover the gray scale information of the laser-stripe image. Finally, the denoised laser-stripe center of the gray scale image was extracted with a barycenter method. Experimental results show that the laser-stripe centers extracted with the proposed method all locate in the laser-stripe region. The average error of the center extraction of a much-noised straight line laser-stripe by this method can reach 0.337 5 pixels.

Key words: light-sectioning method; laser-stripe center extraction; rough metal surface; barycenter method

1 引言

作为激光三角法的一种,光切法三维形貌测量技术在非接触式测量领域以精度高,速度快,适用范围广等特点得到了广泛的应用。基于光切法的三维形貌测量系统,采集的原始数据来源于 CCD 传感器拍摄到的光刀图像,提取此图像中有效条纹中心位置可作为物体表面的高度信息。因此光刀图像的质量影响测量精度,质量差的图像甚至威胁到光切法的可行性。如果测量系统可以较好地屏蔽外界干扰光,而且仪器内部消光,那么影响图像质量的噪声主要来源于物体表面的反射特性。目前,光切法三维形貌测量技术的主要测量对象是朗伯表面的物体,而镜面和反射特性介于两者之间混合反射特性表面^[1-2]形貌难以使用光切法来测量^[3]。粗糙金属表面作为混合反射特性表面中的重要一员,广泛存在于机加工的金属零件、汽轮机叶片等重要军事或工业部件中。对于反射分量几乎完全在镜面反射方向的镜面,可以利用其对编码图像成像获得表面的形貌或者缺陷检测^[3-5];但是,具有混合反射特性的粗糙金属表面,既无法清晰成像,又因为比较强的镜面反射对光刀图像引入过多噪声干扰,无法直接利用朗伯表面可用的光刀中心提取方法。因此,在实施光切法测量粗糙金属表面时,工程应用上一般将这种表面涂漆^[5],改变表面的反射特性后测量,但这种表面处理改变了被测物体表面的原有状态,某些场合无法应用。

为了提取粗糙金属表面上光条中心的位置,目前已研究的解决方法主要有模板法^[6]和偏振化传感器采集图像法^[7-9]。模板法由 Kokku 和 Brooksby 提出,是一种利用有效条纹和噪声组合的图像模板来识别区分有效信息和噪声的方法,但是这种模板适应范围比较窄,只适合特定的或已有经验的表面形貌,难以处理不可预知的或者较复杂的表面形貌。文献^[7-9]在研究了一些高精度的模具和涡轮机叶片具有强反射金属表面的表面特征后,提出一种集成了偏振光源和偏振化传感器采集图像的点源激光三角法,这种方法可

以去除一些强反射引入的噪声,光切法的测量系统可借鉴,但要求满足光线的入射角小于 30° 的假设,使此方法迁移到线激光光源时其使用范围受限。

本文提出一种基于光切法应用的粗糙金属表面的光条中心提取方法,通过对图像中噪声来源分析,得到光条和噪声在图像形态学特征上的区别,再使用一系列图像处理算法将噪声从图像中去除,同时保留光条信息,对分离出的光条灰度信息使用基于灰度重心法的条纹中心提取算法,得到光条中心的位置坐标。

2 噪声来源与特征分析

根据 Beckmann 的粗糙表面散射理论,当一束激光以一定角度入射到粗糙物体表面时,入射光被物体表面散射,其中一部分散射光为镜面反射光,这部分光遵循几何光学反射定律,沿着镜面反射方向散射;另一部分光向空间各个方向散射,散射光强分布受表面粗糙情况的影响。全部的散射光在空间 180° 范围内形成光斑状的散射中心以及从中心向两侧延伸的散射光带^[10-11]。如果用不完全垂直散射表面的探测平面接收散射光,在探测平面成的像呈现中心光斑和延伸到周围的光带,它们均由许多离散的光点(即散斑)组成。散斑的尺寸和对比度由照明光斑的尺寸、照明分布、散射角度以及探测表面与散射表面之间的距离因素共同决定^[12]。根据散斑的高阶统计性质,测度散斑平均“尺寸”的尺度,可以用散斑强度的归一化协方差函数的等当面积 A_c 表示:

$$A_c = \iint C_1(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y, \quad (1)$$

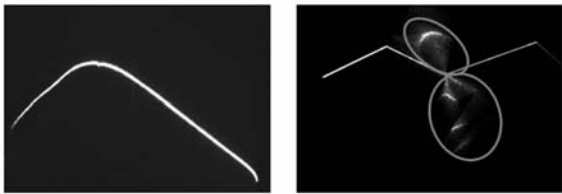
其中 $C_1(\Delta x, \Delta y)$ 为散斑强度的归一化协方差函数,且在 r_0 处强度降为 $1/e$,此特定的光斑的形状产生的散斑面积 A_c 为:

$$A_c = \frac{\lambda^2 z^2}{2\pi r_0^2}. \quad (2)$$

其中, λ 为入射光波长, z 为散射平面到观察平面的距离,因此,可以近似得到有效光条的散斑径向尺寸为 $\sqrt{A_c}$ 。在机器视觉测量领域,数据来自自由

CCD 图像传感器采集到的光学图像, CCD 靶面即为探测平面。获得的光学图像受到 CCD 传感器靶面尺寸与像素分辨率的制约, 如果散斑密集程度超出 CCD 靶面的分辨率, CCD 就难以将离散的散斑光点分辨出来。因此在设计光切法三维形貌扫描仪时, 要保证 CCD 与被测物表面的距离在一定范围内, 使采集的图像为一条连续明亮的光刀条纹, 如图 1(a) 所示, 且条纹截线上的强度分布为近似高斯分布或削顶的高斯分布^[13]。CCD 采集到的光刀图像的有效信息是灰度连续的条纹, 即可以使用一致的条纹中心提取规则得到被测物体表面的高度。

粗糙的金属表面, 比如经过车、铣机加工的金属表面, 具有较强的镜面反射, 可以对较近的强光源成较模糊像。如果测量仪器屏蔽外界光源, 且仪器内部消光, 那么干扰光源主要来自两方面, 其一是激光器光源本身在出射口产生的明亮的散射, 这种噪声的去除方法在天津大学张国雄教授的课题组发表的相关文献中已经提到^[8-10], 如果仪器的设计满足光源与被测物面具有足够的距离, 此类噪声光强小, 可以设定去除灰度阈值; 其二是被测表面相互临近部分的相互反射光的干扰, 即被测表面其他区域的光刀条纹散射到当前检测区域形成干扰噪声, 如图 1(b) 为一圆柱阶梯状的金属标定块的光刀图像, 椭圆框中的区域即为噪声图像。



(a) 与有噪声(椭圆框内)图像 (b) 比较示意图
(a) Without noise and image (b) With noise

图 1 无噪声图像

Fig. 1 Diagrams of metal surface with and without noise

根据光学散斑的一阶统计性质^[12], 偏振入射光被不同类型的表面反射后的偏振性质可能很不相同。当线偏振入射光从粗糙的金属表面反射时, 反射光可以认为是偏振状态, 而此反射光再次入射到临近的粗糙金属表面时, 会因为再次入射光的相干产生散斑驱动的散斑, 即复合散斑。由于复合散斑产生的平面与第一次散射平面的距离

小于观察面与第一次散射平面的距离, 因此复合散斑的照明光斑尺寸小于第一次散射后的散斑尺寸 $\sqrt{A_c}$ 。根据式(2), 可估算出复合散斑尺寸与 r_0 同数量级, 由于有效尺寸 $\sqrt{A_c} \ll r_0$, 因此, 复合散斑在 CCD 靶面上形成的面积明显大于激光初次入射到金属表面形成的散斑面积。故在 CCD 采集的图像中, 复合散斑以颗粒形态呈现, 与光条呈现的灰度连续的条纹形态对比明显。

对于灵敏度均匀的 CCD 探测器, 探测器的对比度:

$$C = 1/\sqrt{M}, \quad (3)$$

$$M = (A_m/A_c) \{1 - \exp[-2(A_m/A_c)] \cdot [I_0(2A_m/A_c) + I_1(2A_m/A_c)]\}^{-1}, \quad (4)$$

其中 $I_0(x)$ 及 $I_1(x)$ 分别是零级和一级第一类修正的 Bessel 函数, A_m 为探测器的有效测量面积。通过数值积分, 可以求得 M 随 A_m/A_c 的关系曲线, 对于一切情况, M 随 A_m/A_c 随的增大而增大。由上述分析, 初次散射的散斑面积小于再次散射的面积, 则复合散斑的 M 值小于光条散斑的 M 值, 复合散斑的对比度降低。因此, 必须采取图像增强的方法突出复合散斑即噪声的颗粒特征。

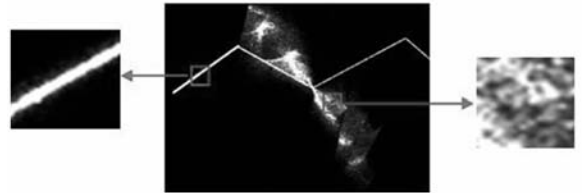


图 2 激光条纹(左方框)与噪声(右方框)的图像形态特征比较

Fig. 2 Comparison of morphological characteristics between laser stripe and noise

3 光条中心提取算法设计

上述分析表明, 从图像形态学角度, 区分噪声与光条的主要特征在于图像的灰度离散程度, 即颗粒状与连续条纹的区别。因此, 本文首先利用一系列基于图像形态学的处理方法, 突出噪声的颗粒化特征, 然后通过连通区域面积计数对光条和噪声进行形态学分类, 设定面积阈值, 去除噪声, 输出二值化的光条模板, 再用模板与原灰度图像相乘, 获得光条的灰度图, 最后利用灰度重心法

提取有效光条的中心。算法的流程如图3所示。

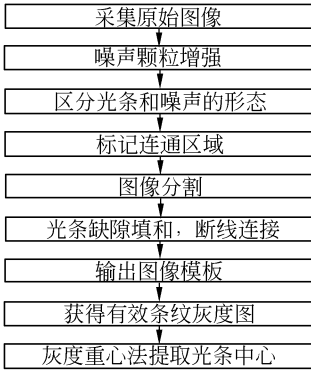


图3 光条中心提取算法示意图

Fig. 3 Flow chart for center extracting algorithm

3.1 噪声去除算法设计

去除噪声要达到的效果即去除颗粒感明显的图像区域,保持灰度连续的条纹形态图像区域。本文以图4所示的经过机加工的台阶式圆柱形金属标定块为例。在扫描过程中某时刻光刀采集的原始图像,如图5所示,其中椭圆框中为噪声,未被椭圆框圈出的折线状线条为光条,光条上方的噪声形状和光条类似,且和光条的灰度值处在同一水平。因此首先要增强噪声的颗粒感,本文采用 Sobel 梯度算子图像增强方法,其特点是突出图像中的小区域特征并能去除图像中变化缓慢的背景。用 $2a+1$ 行, $2b+1$ 列的一阶微分梯度掩模板 $w(s,t)$, 对图像 $f(x,y)$ 进行卷积,如下式:

$$g(x,y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s,t) f(x+s,y+t), \quad (5)$$

当 $a=b=1$ 时,得到了 Sobel 梯度算子,其近似解析表达式如下式:

$$\nabla f = |(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)| + |(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)|, \quad (6)$$

其中 $z_i (i=1,2,\dots,9)$ 为当前处理窗口的行列顺序像素值, Sobel 模板的所有处理掩模系数中的系数总和为 0, 这使灰度恒定区域的响应为 $0^{[14]}$ 。因此,使用 Sobel 算子,可以去除弥散在颗粒光斑周围的灰度不变或者变化缓慢的小灰度背景,突出图像中边缘的特征,再用得到的边缘特征与原图像相加,一方面提高了颗粒光斑的对比度,使其和周围的背景亮度被明显的区分;另一方面,很好地保持了条纹图像的形状,如图6(a)所示。再以图像的灰度平均值为阈值,进行图像的二值化分

割,分离颗粒光斑和背景亮度,使噪声在图像形态学上呈现离散的小面积连通区域,彻底地区分开光条和噪声的形态,如图6(b)所示。这2种形态的八连通区域面积为不同的数量级。因此,对二值化后的整幅图像进行八连通域的标记,对所有独立的连通区域面积计数。由公式(2)知,对测量范围一定的系统,噪声连通域的尺寸由被测物体表面到 CCD 靶面距离决定。根据本测量系统的设置,噪声图像的连通域面积均在 15 个像素以内,可设置面积阈值进行图像分割,即面积小于阈值的连通区域被去除,面积大于阈值的连通区域被保留。如此去除了噪声,保留了有效条纹。如图6(c)所示。

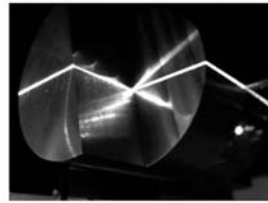


图4 被测物体
Fig. 4 Measured object

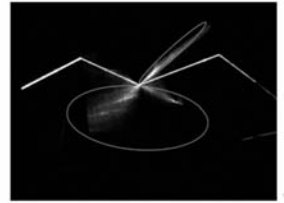


图5 原始图像
Fig. 5 Original image



(a) 梯度增强后的图像
(a) Gradient enhanced image



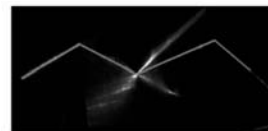
(b) 二值化图像
(b) Binary image



(c) 去噪后的图像
(c) Denoised image



(d) 光条灰度图
(d) Gray image of laser stripe



(e) 光条中心
(e) Laser stripe center



(f) 光刀中心提取结果放大图
(f) Enlarge image of center extraction result of laser stripe

图6 光条中心提取过程示意图

Fig. 6 Center extraction process of light stripe

3.2 有效条纹图像复原算法设计

噪声离散程度增强和图像的二值化处理,可能使光条的边缘丢失信息,或者较细的连接处会间断。本文使用图像形态学运算开闭操作相结合补偿损失信息,或者连接断线。开操作是使用模板先对图像进行腐蚀,再对腐蚀的结果用模板进行膨胀。开操作一般使对象的轮廓变得光滑,断开狭窄的间断和消除细的突出物。闭操作是使用模板先对图像进行膨胀,再对膨胀的结果用模板进行腐蚀。这种运算可以消弥狭窄的间断和细长的鸿沟,消除小的孔洞并填补轮廓线中的断裂^[14]。依次对图像实施开操作和闭操作可以连接断线,弥补条纹边缘损失的信息,也避免了膨胀造成的条纹过度展宽。为了保证灰度重心方法应用时具有足够的灰度信息,本文设置开闭操作参数满足处理后的光条在其上下边缘展宽 3 个像素。经过上述处理,含有噪声的原始图像已经转化成无噪声的有效光条二值化模板,用此二值化模板与原始图像相乘,即得到了光条的灰度图,如图 6(d)所示。

3.3 灰度重心法提取光条的中心

灰度重心法是一种亚像素精度的光条中心提取算法,适合于灰度分布呈高斯分布或者削顶高斯分布的条纹中心提取,它能够减小由于结构光光条灰度分布的不对称引起的误差,且对截面的平移不敏感^[15],在亚像素精度的提取算法中兼顾了速度。灰度重心法基本原理为对条纹图像中的每一列计算灰度重心的位置 \bar{x}_k 作为条纹的中心位置。设第 k 列非零值区间为 (p, q) ,有

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=p}^q i \cdot I_i}{\sum_{i=p}^q I_i},$$

其中 I_i 为图像第 i 个像素点的灰度值。本文在光条中心提取之前,虽然去除了与光条不同位置的噪声;但是当噪声与光条相交时,有效光条和噪声重合的区域仍然保留下来,从而造成亮度波峰的不对称,因此用灰度重心法提取条纹中心可以较好的抑制这种影响。提取的灰度中心结果如图 6(e)所示,在形态和灰度上噪声与有效条纹相似的区域的结果放大如图 6(f)所示,可见噪声对提取的光条中心没有影响。

4 实验分析

4.1 光条中心提取效果比较

实验一的被测物体为汽轮机单叶片,测量系统所使用的氦氖激光器经过扩束形成一条激光线,在测量范围内的宽度为 1 mm,所用的 CCD 摄像机为 576 pixel×768 pixel,此三维扫描仪 CCD 分辨率和靶面中心距离被测表面的范围,满足三维形貌扫描仪采集的光条灰度连续且截线上灰度为类似高斯分布。用本文提出的方法提取的光条中心如图 7(a)所示,而直接采用灰度阈值分割后灰度重心光条提取方法的结果如图 7(b)、7(c)、7(d)所示,其中图 7(b)、7(c)、7(d)表示选取的归一化的灰度阈值分别为 0.3, 0.8, 0.99 的中心提取结果。可见,给出的阈值由低到高,提取的光条中心都不可避免的出现在噪声的位置上,偏离了光条,这种情况随着阈值的提高有所改善,但是阈值的过度提高使部分有效光条被去除,尤其当归一化阈值为 0.99 时,光条右侧的部分出现了间断,有效信息丢失比较严重。而图 7(a)所示的本文方法的结果,其提取中心全部出现在有效光上,而且有效光条的信息得到了最大的利用,可见本文提出方法达到了更佳的效果。

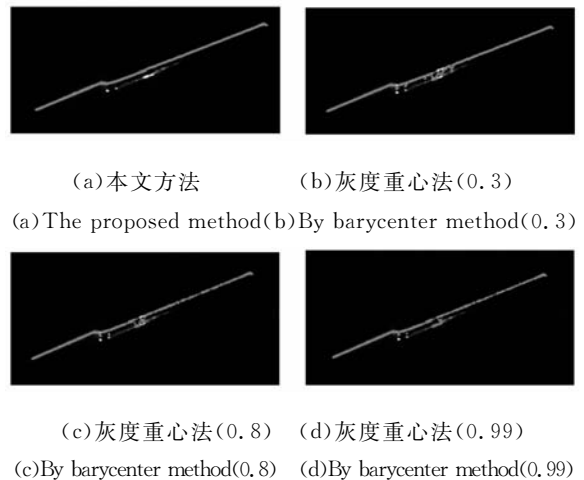
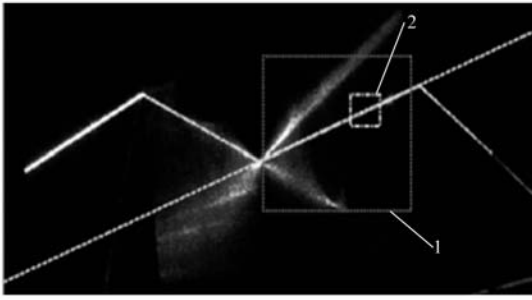


图 7 光条中心提取方法的效果图例

Fig. 7 Example of center extraction result of laser stripe

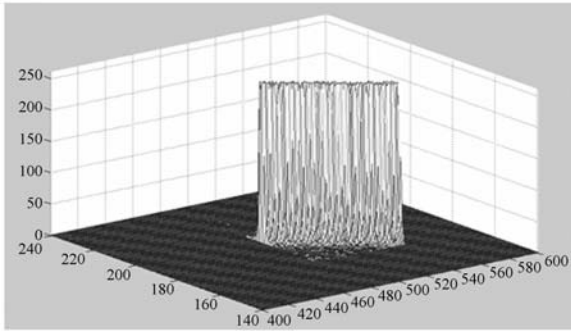
4.2 直线条纹提取中心点的误差比较

实验二的被测物体为图 4 所示的经过机加工的金属标定块,测量系统所使用的氦氖激光器经



(a) 选定区域位置

(a) Location of selected area



(b) 图(a)矩形框2中灰度分布示意图

(b) Gray-scale distribution of image in box2 of fig. (a)

图8 精度比较试验选定区域示意图

Fig. 8 Selected area in accuracy comparison experiment

过扩束形成一条激光线, CCD传感器的设置满足三维形貌扫描仪采集的光条为灰度连续且截线上灰度为类似高斯分布。被测物体的表面含有3个平面, 当线激光入射到平面上时, 在平面上呈现的是一条直线。根据摄像机的透视投影关系, 平面上的直线光条在图像上仍表现为直线, 因此可以选取直线条纹上没有噪声的部分。如图8(a)所示的矩形框2中的直线条纹局部, 此区域的光条灰度分布如图8(b)所示, 没有噪声干扰, 则可以对这部分光条进行灰度重心法的光条中心提取, 得到的光条中心位置可认为是光条局部直线上无噪声条件下的灰度重心法求得理想数据, 再将这些位置数据用直线拟合, 即拟合出这条直线条纹在矩形框1内部分的理想直线中心。如图8(a)中的直线所示, 即为框1内光条的理想条纹中心所成的直线, 对同列噪声较多的图8(a)中的矩形框1所示区域进行条纹中心提取, 不同灰度阈值参数下的灰度重心法和本文提出方法得到的矩形框1中各列的条纹中心位置数据与理想直线中心的数据进行做差求平均, 得到矩形框1中各列平均误差的结果如表1所示。

表1 提取的条纹中心位置的平均误差对照表

Tab. 1

中心提取方法	灰度重心法阈值						本文方法
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99	
等效灰度阈值	128	153	179	204	230	253	—
平均误差(像素)	5.269 0	4.302 0	3.318 1	2.612 6	2.496 5	17.438 4	0.337 5

由表1可知, 本文提出的光条中心提取方法, 对于实验中测量的反射特性较强的机加工金属表面, 在直线条纹上219个连续列的中心提取的平均误差最小, 达到了0.337 5 pixel。

5 结论

本文提出了一种粗糙金属表面的光条中心提

取方法, 首先使用图像梯度增强方法和灰度阈值分割, 在图像形态学层面, 将噪声转化成颗粒状特征, 同时保持有效光条的连续条纹状特征; 然后, 根据图像连通区域面积对光条和噪声进行形态学分类, 去除面积小的噪声, 输出二值化的光条模板, 用此模板与原灰度图像相乘, 获得无噪声的光条灰度图; 最后利用灰度重心法提取有效光条的中心。通过实验比较, 本文提出的方法使提取的

中心全部都落在了光条位置范围内,避免了直接使用灰度重心法提取的光条中心偏离光条区域的缺陷。通过对噪声较多的图像区域进行直线光条

中心提取误差分析,本文提出的光条中心提取方法与不同灰度阈值参数下的灰度重心法比较,中心提取的平均误差更小,达到了 0.337 5 pixel。

参考文献:

- [1] SHREE K N, KATSUSHI I, TAK-EO K. Determining shape and reflectance of lambertian, specular, and hybrid surfaces using extended sources[C]. *International Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision, Tokyo: MIV-89, 1989*: 169-175.
- [2] 刘瑞玲,韩九强. 透视投影下的镜面反射表面形状恢复新算法[J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(2): 6-9.
LIU R L, HAN J Q. Shape from shading for specular surfaces under perspective projection[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(2): 6-9. (in Chinese)
- [3] XUE CH K, SUN Y K. An improved structured light inspection of specular surfaces based on quaternary coding[C]. *MIRAGE '09 Proceedings of the 4th International Conference on Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2009*: 128-139.
- [4] KAMMEL S, LEON F P. Deflectometric measurement of specular surfaces[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(4): 763-769.
- [5] PARK J S, TOU J T. Highlight separation and surface orientations for 3-D specular surface [C]. *Physics-Based Vision: Principles And Practice Shape recovery, USA: Jones and Bartlett Publishers, 1992*: 298-302.
- [6] KOKKU R, BROOKSBY G. Improving 3D surface measurement accuracy on metallic surfaces [J]. *SPIE*, 2005, 5856: 618-624.
- [7] 赵小松,张国雄,张宏伟. 测量强反射表面的测头研究[J]. *天津大学学报*, 2004, 37(3):274-277.
ZHAO X S, ZHANG G X, ZHANG H W. Probe for measuring high reflective surface[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(3):274-277. (in Chinese)
- [8] 张宏伟,张国雄,李真,等. 非接触光学测头在金属强反射表面测量中的应用[J]. *天津大学学报*, 2004, 37(10):910-913.
ZHANG H W, ZHANG G X, LI ZH, *et al.*. Application of non-contact optical probe in measurement of high-reflective metallic surface[J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(10):910-913. (in Chinese)
- [9] 赵小松,张国雄,刘征,等. 测量强反射自由曲面的测头设计[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(2):274-276.
ZHAO X S, ZHANG G X, LIU ZH, *et al.*. The probe design of high-reflective sculptured surface measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(2):274-276. (in Chinese)
- [10] 周莉莉,赵学增,郑俊丽. 基于散斑强度相关函数的表面粗糙度测量方法[J]. *光电工程*, 2004, 31(7):50-53.
ZHOU L L, ZHAO X Z, ZHENG J L. A surface roughness measuring method based on intensity correlation function of speckles[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 31(7):50-53. (in Chinese)
- [11] BECKMANN P, SPIZZCHINO A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1963.
- [12] GOODMAN J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. USA: Roberts and Company, 2006.
- [13] 贾倩倩,王伯雄,罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):390-396.
JIA Q Q, WANG B X, LUO X ZH. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [14] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
- [15] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
ZHANG G J. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



赵博华(1984—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事机器视觉及物体三维形貌测量等方面的研究。E-mail: zbh07@mails.tsinghua.edu.cn



张金(1973—),男,安徽潜山人,副教授,博士生,主要研究领域为电子技术,超声测量,精密测试。E-Mail: zjin08@mails.tsinghua.edu.cn



罗秀芝(1968—),女,高级工程师,主要从事机械系统动态测试等方面的研究。E-mail: luoxz@tsinghua.edu.cn

导师简介:



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1970年、1982年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS技术,光学测量技术,生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua.edu.cn

●下期预告

超快电子脉冲的时域压缩技术

田进寿¹,雷晓红^{1,2},温文龙¹,徐向晏¹,王俊锋¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,陕西 西安 710119;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

采用时间聚焦的方法来改善超快诊断技术(条纹相机或超快电子衍射仪)的时间分辨能力,通过在时间聚焦电极上加随时间线性增加的电场来补偿光电子在光电阴极和阳极之间的时间弥散,这种电场可以使得快电子相对变慢,慢电子相对变快,从而达到在时域压缩电子脉冲的目的。通过 Monte Carlo 方法和有限差分法对大量光电子的追踪模拟,这种利用随时间变化的电场对电子脉冲速度进行调制的方法可以将初始时间宽度为 300 fs 的电子脉冲压缩到 50 fs,为研制时间分辨能力高于 100 fs 的条纹相机和超快电子衍射仪等超快诊断技术奠定了理论基础。