

激光与光电子学进展

高动态范围表面三维形貌重建新方法

毛翠丽^{1,2}, 卢荣胜^{1*}¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;²南阳理工学院智能制造学院, 河南 南阳 473004

摘要 利用光栅条纹投影法进行非接触式三维形貌测量已经成为各个领域中对复杂被测对象进行尺寸测量的主要方法。然而,对表面同时具有高反射率和低反射率区域的被测对象进行快速准确的三维测量,一直是众多学者的研究对象和工业中急需解决的问题。本文首先根据理论分析和仿真分析,得出投影不同条纹强度幅值在不同信噪比时的相位误差大小,据此进一步提出无需提前标定被测表面反射率及最佳投影条纹强度幅值时的高动态范围三维形貌测量新方法:首先利用两组不同强度幅值的相移光栅条纹图进行三维测量;然后对两次测量进行融合得出比较完整的三维形貌测量结果,通过实验验证了该方法的可行性和有效性;最后对反射率相差较大的被测物体表面进行三维形貌测量实验。根据实验结果可知,该方法不仅可以有效测量高动态范围表面,而且提高了测量效率,并为最近提出的高速测量方法(单个投影周期内两次采集条纹图)的有效性提供了理论与实验依据。

关键词 仪器;测量与计量;条纹投影轮廓术;三维重建;高动态范围;条纹强度幅值

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212939

A New Method for 3D Shape Reconstruction with a High Dynamic Range Surface

Mao Cuili^{1,2}, Lu Rongsheng^{1*}

¹*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

²*School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan, China*

Abstract Three-dimensional (3D) shape non-contact measurement with fringe projection profilometry is a primary method for measuring the size of complex objects in many areas. However, for an object whose surface has both high reflectivity and low reflectivity areas, rapid and accurate 3D measurements have been the research object of many scholars, and is considered an urgent problem that needs to be solved in the industry. In this study, the phase errors of different fringe projection intensity amplitudes at different signal-to-noise ratios are first obtained using both theoretical and simulation analysis. Further, a new method, which can achieve the high dynamic range shape measurements without requiring calibration of the measured surface reflectivity and the optimal projection fringe intensity amplitude in advance, is proposed. Specifically, two appropriate different fringe intensity amplitudes are projected, and the measurement results are combined. The feasibility and effectiveness of this method are verified experimentally. Finally, the 3D shape measurement experiment is carried out on the surface of the measured object with large reflectivity difference. According to the experimental results, this method can not only effectively measure a surface with a large range of reflectivity variations, but can also improve the measurement efficiency and provide a theoretical and experimental basis for the effectiveness of the recently proposed high-speed measurement method (double-shot-in-single-illumination).

Key words instruments, measurement and metrology; fringe projection profilometry; 3D reconstruction; high dynamic range; fringe intensity amplitude

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-02-02; 录用日期: 2022-02-18; 网络首发日期: 2022-02-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003801); 国家自然科学基金(51875164); 河南省教育厅重点科研项目(21B535002); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102210048)

通信作者: *rslu@hfut.edu.cn

1 引言

基于数字条纹投影技术的结构光三维形貌测量方法,由于测量点云密度大、测量精度高、测量速度快、对被测对象的形状及材料的适应性强,并且其系统组成简单、成本低、移动灵活,所以在各种行业都有广泛的应用前景^[1]。

由于被测对象表面颜色、纹理的多样性,形成不同大小的表面反射率,因此,高动态范围三维形貌测量一直是结构光三维形貌测量技术中的重点和难点。表面反射率由于测量角度、表面纹理不一致等对测量结果的准确性有很大影响,尤其对复杂纹理表面的高反射率部分,容易形成饱和,进而造成较大测量误差甚至错误的测量结果。为了消除表面反射率不一致造成的图像饱和及较大测量误差问题,近年来国内外众多学者提出了多种高动态范围表面测量方法^[2],主要有以下几种:1)向被测表面喷涂一层可产生漫反射现象的薄粉末。使被测表面为漫反射表面,但是易造成喷涂不均匀,影响测量精度,并且会对文物、衣服等被测对象的表面造成损伤,一般不宜使用;2)选择合适的单一曝光时间^[3-6]。单一曝光时间需要遵守一个原则,即避免采集图像饱和。该方法关键在于计算出最佳曝光时间,得出最佳曝光时间后,测量速度较快,但是单一曝光时间存在被测表面的低反射率部分曝光不足、高反射率部分达到饱和的缺点,文献^[5-6]利用多次采集同一幅未饱和的低强度幅值图像,进行叠加(重复投影)来进行相位恢复,提高相位恢复精度,该方法为了使采集图像所有像素点均未达到饱和,采用较低强度幅值,因此信噪比较低。其中文献^[5]每一幅条纹图重复采集40次,采用每一个像素点的强度平均值恢复相位来提高相位测量精度,因此大大降低了测量效率;3)使用多次曝光^[7-9]。调整不同曝光时间,使不同表面反射率区域采用不同的曝光时间,得到未饱和的最佳相机采集灰度值,然后进行图像融合,获取最佳的组合条纹图。该方法提高了测量准确度,但是需要提前进行多次试验,标定出不同被测位置处的最佳曝光时间,比较耗时,降低了测量速度;4)设计单组最佳投影条纹图案^[10-13]。对具有不同反射率的表面,为了仅投影一组条纹图即可采集得到未饱和的变形条纹图,需要根据采集图像对投影条纹图重新设计。如文献^[13]采用递归算法调整投影图案的最佳亮度,该方法提高了三维形貌的测量精度,但是需要针对不同的测量对象提前多次试验计算得出最佳投影条纹图;5)增加条纹投影次数。当相移步数为条纹周期 P 的一半 $P/2$ (P 为偶数)或 P (P 为奇数)时,可以对饱和和条纹进行准确的相位提取^[14]。但是其投影条纹幅数较多,降低了测量速度;6)原始条纹和反向条纹组合测量方法^[15-16]。此方法原理简单,无需提前标定。但是针对不同的相移步数,需要不同的计算方法,计算比较复杂,并且存在使

用环境的局限性;7)彩色条纹投影^[17-19]。投影白色或者不同颜色的条纹图,分别采集得到不同颜色的条纹图及其相位,得到组合相位图。但是投影条纹数量大、算法复杂,降低了测量速度。并且普通工业相机均为单CCD或单CMOS相机,使用彩色图像降低了测量精度,如果使用3CCD相机,提高了精度,但是大大提高了系统成本;8)多相机+多投影仪组合^[20]。使用不同的相机和投影仪进行测量结果的组合,提高了测量精度,但是系统比较复杂、成本比较高、算法复杂、系统标定比较复杂;9)使用偏振方法^[21]。利用偏振片避免图像饱和,对饱和区域避免了饱和问题,提高了精度,但是对本来就暗的区域易形成曝光不足,且调整偏振角度时易造成系统标定参数的改变,降低测量精度。文献^[22]提出了改进的线偏振方法,增加了条纹对比度。还有学者根据垂直和水平条纹投影实验,测得最佳条纹投影角度的方法^[23],以及利用傅里叶变换方法,但是随着被测对象的尺寸、位置、表面反射率的改变,最佳投影条纹角度也会随之变化。Liu等^[24]提出利用液晶显示器、投影仪和相机联合系统测量镜面反射和漫反射表面。另外还有投影格雷码方法^[25]、相位纠正方法^[26]等,虽然这些方法都取得了一定的效果,但是均存在测量效率和测量精度之间的突出矛盾。近来有学者提出了单个投影周期内两次采集条纹图的高动态范围测量技术(DSSI)^[27-30]。利用单个投影期间相机曝光两次,两次曝光时间不同,采集得到的条纹强度不一致,可以得到两种不同亮度级别的条纹图像,对未饱和和图像进行融合可得到组合条纹图,该方法在提高了高动态范围测量精度的同时也提高了测量速度,但是进一步降低了低曝光图像的信噪比。

为了解决高动态范围表面三维测量问题,减少最佳曝光时间、最佳投影条纹强度等的标定工作量,同时缓解测量速度和测量精度之间的矛盾,本文提出一种具有普适性的高动态范围表面三维测量方法:无需复杂标定,对高动态范围表面仅投影两种不同强度幅值的光栅条纹图,避免高反射区域饱和和暗反射区域曝光不足的问题,同时提高信噪比,有效提高了高动态范围表面三维测量精度。

2 相位测量原理、仿真及分析

结构光相位测量轮廓术的测量过程主要为:首先搭建数字相机-投影仪三维测量系统,并对其进行标定,得出相机参数及三维空间坐标与图像坐标、相位值之间的数学模型;然后由数字投影仪将计算机产生的理想正弦相移条纹图投影至被测物体表面;再由相机采集调制后的变形条纹图,根据一定的相移算法计算得到解包裹相位值;最后根据系统标定结果、变形条纹图及解包裹相位值计算出被测物体的三维点云。

2.1 相移算法(原理)

相位测量是光栅条纹投影结构光法三维形貌测量

的基础,其投影正弦条纹的数学表达式为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_n], \quad (1)$$

式中: (x, y) 为空间坐标; $I_n(x, y)$ 为投影第 n 幅光栅条纹图像的强度分布值; $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别为背景光强和调制幅度; $\delta_n = 2\pi n/N$ 为投影正弦条纹光栅序列第 n 幅光栅的初始相位; $n=0, 1, \dots, N-1, N, N$ 为相移步数; $\varphi(x, y)$ 为该点的相位值。对于任意给定的被测点,理想情况下,不考虑干扰时,由投影仪投影、被测物面调制后的第 n 幅变形条纹图,相机采集可得

$$I_n^c(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_n]. \quad (2)$$

条纹的对比度为

$$M(x, y) = \frac{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y)} = \frac{B(x, y)}{A(x, y)}. \quad (3)$$

设计条纹时,保持式(1)中 $A(x, y) = B(x, y)$,即可使 $M(x, y)$ 达到最大对比度。其中 $I_n^c(x, y)$ 为采集得到的强度值,为已知量,当前条纹图的 $\delta_n = 2\pi n/N$ 为已知值,则有三个未知数 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 和 $\varphi(x, y)$,因此至少需要三个方程方才能求出这些参数,典型的相位测量方法主要有三步、四步、五步相移法等。其中三步、四步相移法具有较少的相移步数,是所需投影条纹图数量最少的相移方法,因此适合实时高速测量,使用非常广泛,利用具有 $\delta_n = 2\pi n/N (N \geq 3)$ 相位差的 N 幅相移条纹图来恢复被测物体的实际待求相位 $\varphi(x, y)$,可得

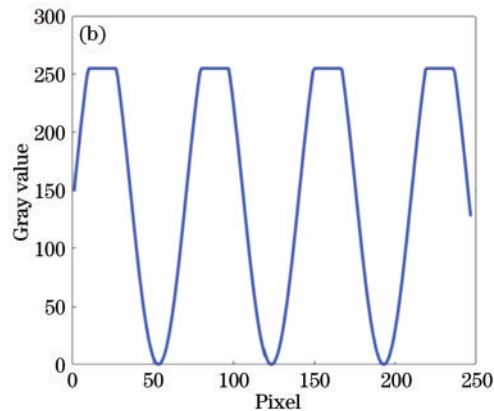
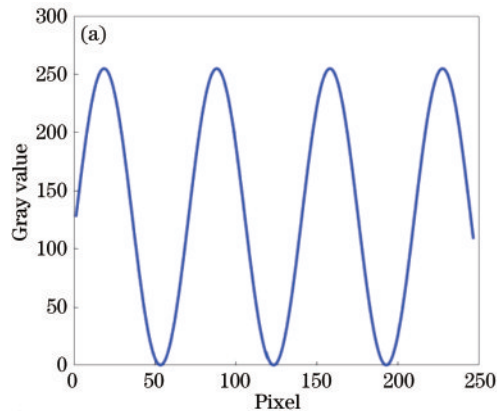


图 1 采集条纹强度分布图。(a)未饱和条纹图;(b)饱和条纹图

Fig. 1 Captured fringe intensity distribution. (a) Unsaturated fringe pattern; (b) saturated fringe pattern

对于三维测量用工业相机, $I_n \ll \rho r t I_n^p(x, y)$, 所以可得 $I_n^c(x, y) \approx \rho r t I_n^p(x, y)$ 。根据式(4)可知,对于同一被测点, ρ, r, t 为常数,改变 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 的大小,并不影响相位 $\varphi(x, y)$ 的测量结果,对于存在反射率较大的被测表面,可以降低投影条纹的 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 来防止采集图像的饱和。为了验证该方法,使

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(\delta_n)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(\delta_n)}. \quad (4)$$

2.2 不同强度条纹图对相位测量结果的影响

计算机产生的投影条纹强度值通常为 $0 \sim 255$,对于存在不同反射率的被测物体表面,如果投影的光栅条纹图的光强最强值为 255,极易形成饱和区域,根据前一章节的分析,目前被广泛使用的方法是降低投影光栅条纹强度幅值,使得采集的变形条纹图没有饱和区域。为了寻找合适的投影条纹强度幅值,出现了各种各样的方法,这些方法主要基于提前标定被测表面,找出不同区域未使采集条纹图像达到饱和的投影条纹图最大强度幅值,再进行图像融合,得出最佳组合强度投影条纹图,或者进行多组条纹投影。标定过程繁琐,而且对于不同的被测对象,或者同一被测对象变换不同的测量角度和测量区域时,需要重新进行标定,耗时耗力。

相机对被测表面采集图像为

$$I_n^c(x, y) = \rho r t I_n^p(x, y) + I_n, \quad (5)$$

式中: ρ 为相机的灵敏度; r 为被测表面反射率; t 为相机进行图像采集的时间; I_n^p 为投射到物体表面的外界光强; I_n 为随机噪声。

对于反射率较大的被测表面,可能会产生 I_n^c 大于 255,进而产生相位测量误差,采集条纹如图 1 所示,图 1(a) 为未饱和时采集的正弦条纹,可以用来进行相位解包裹及进一步处理,图 1(b) 为高反射率被测表面采集的饱和条纹图,条纹强度上峰处已经变形,进行解包裹处理时会产生相位测量误差。

用计算机设计产生一系列不同幅值的光栅投影条纹图,用 A 代替 $A(x, y)$, B 代替 $B(x, y)$,幅值分别为: 255 ($A=B=127.5$)、220 ($A=B=110$)、200 ($A=B=100$)、180 ($A=B=90$)、160 ($A=B=80$)、140 ($A=B=70$)、120 ($A=B=60$)、100 ($A=B=50$)。计算机产生条纹图如图 2 所示,其幅值分别为 255、220、200、180、160、140、120、100。第 500 行的强度分布如图 3 所示。

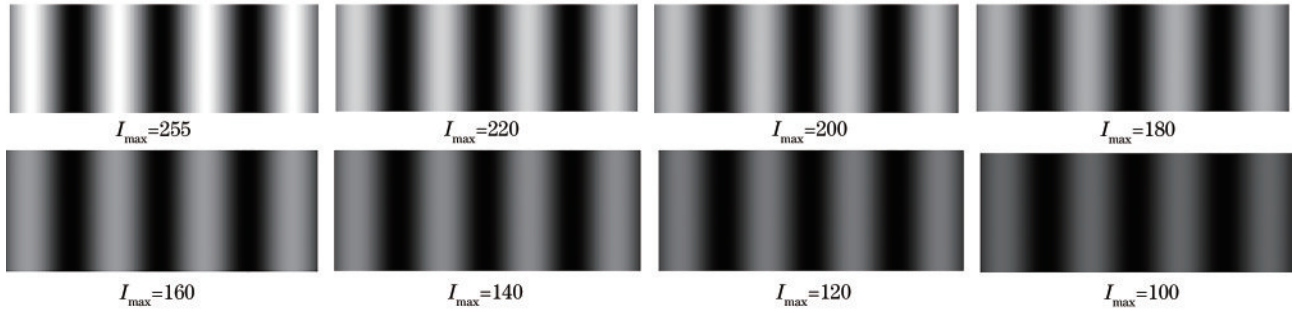


图 2 不同强度幅值的光栅条纹图

Fig. 2 Grating fringe patterns with different intensity amplitudes

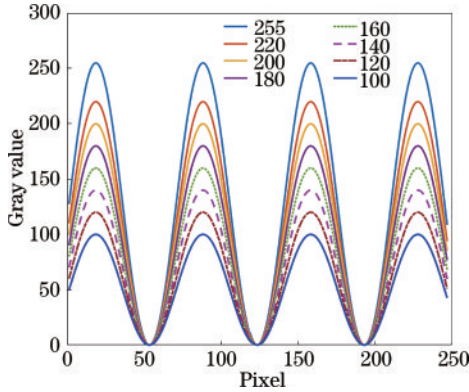


图 3 不同强度幅值条纹图的某一行灰度分布曲线

Fig. 3 Gray distribution curves of a line of fringe patterns with different intensity amplitudes

当投影不同幅值的条纹时,解包裹相位值相同,其中某一行的解包裹相位图相位恢复分布曲线如图 4 所示(重合为一条线)。由仿真结果可知,不同光栅条纹强度幅值的相位恢复结果完全一致,相位恢复不受条

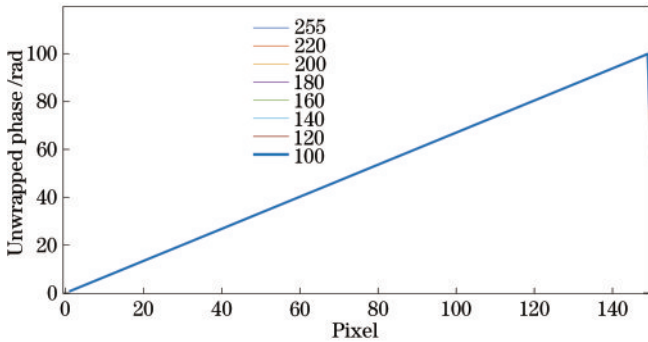


图 4 不同条纹强度幅值时的某一行解包裹相位值

Fig. 4 Unwrapped phase values of a line with different fringes

表 1 不同投影条纹幅值和信噪比时的相位误差的标准差

Table 1 Standard deviation of phase error under different projection fringe amplitudes and signal-to-noise ratios

Signal-to-noise ratio /dB	Fringe amplitude							
	100	120	140	160	180	200	220	255
25	0.0724	0.0781	0.0661	0.0591	0.0834	0.0421	0.0724	0.0524
30	0.0353	0.0352	0.0355	0.0348	0.0350	0.0351	0.0349	0.0350
35	0.0204	0.0199	0.0201	0.0202	0.0199	0.0200	0.0197	0.0199
40	0.0124	0.0123	0.0121	0.0118	0.0118	0.0117	0.0117	0.0115

纹强度幅值的影响。

2.3 包含噪声时不同光栅条纹幅值的相位解包裹仿真分析

在成像过程中不希望被采集到的、成像目标外的信号,被称为工业相机的噪声。工业相机的噪声不可避免,通常用信噪比来表示工业相机的噪声大小,是工业相机的一个主要参数,CCD 工业相机的典型值一般为 45~55 dB,CMOS 相机的信噪比会稍微低一些,近年来随着 CMOS 相机制造工艺的提高,信噪比越来越高。此处采用对计算机生成的光栅条纹图中加入信噪比分别为 25、30、35、40 dB 的高斯噪声进行仿真,研究不同信噪比下不同光栅条纹幅值时相位解包裹误差的变化情况。图 5 为对不同光栅条纹幅值加入信噪比为 30 dB 的高斯噪声时的光栅条纹图,图 6(a)、6(b)、6(c)、6(d)分别是信噪比为 25、30、35、40 dB 时不同条纹强度幅值(100~255)时的相位误差曲线。表 1 为不同投影条纹强度幅值、不同信噪比大小时相位误差的标准差。图 7 为不同信噪比时不同投影条纹强度幅值的相位误差标准差曲线。由图 6、图 7 和表 1 可知,信噪比小于等于 25 dB 时,相位误差突然增大。当信噪比大于等于 30 dB 时,相位误差变化不大,随着信噪比的减小,相位误差逐渐增大,但同一信噪比下各不同条纹幅值的相位误差相差不大。

根据以上解包裹相位误差大小及分析可知,噪声越大,信噪比越低,相位误差越大。但是对于信噪比大于等于 30 dB 的工业相机,当光栅条纹强度幅值大于等于 100 时,对不同信噪比的工业相机,相位误差值均不大,也即对于变化的条纹投影强度幅值,相位误差值的大小是近乎稳定的。CCD 工业相机的信噪比的典型值一般

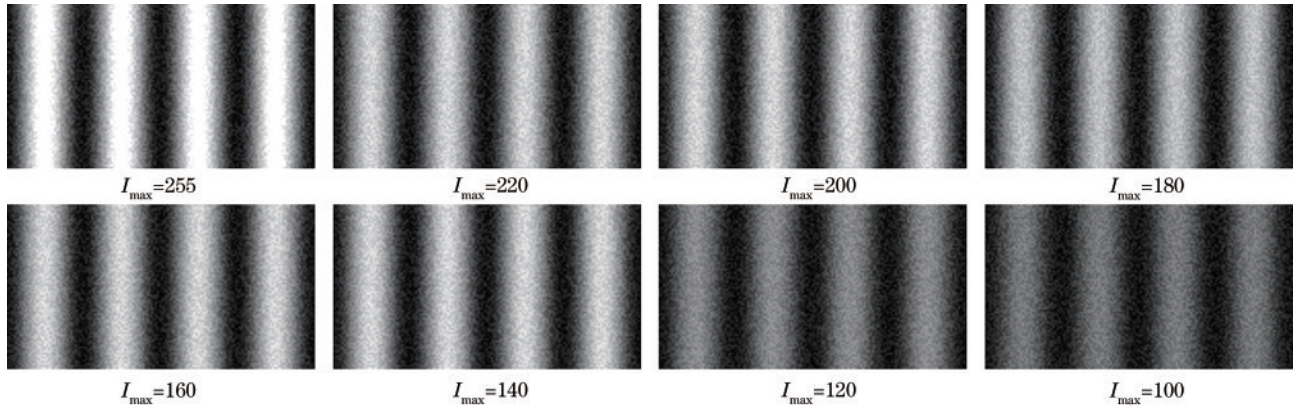


图 5 信噪比为 30 dB 时不同强度幅值的光栅条纹图

Fig. 5 Grating fringe patterns with different intensity amplitudes when signal-to-noise ratio is 30 dB

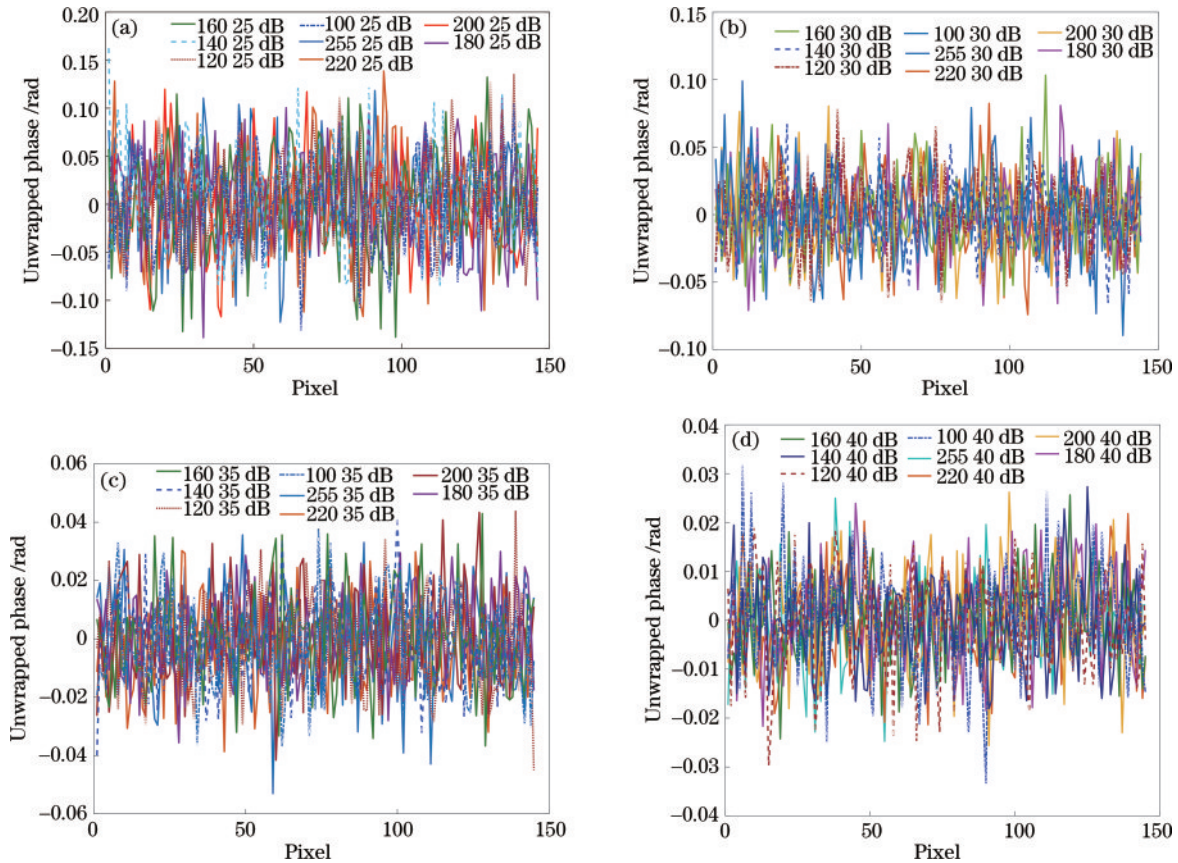


图 6 不同强度幅值不同信噪比时的解包裹相位误差曲线。(a)~(d)信噪比分别为 25、30、35、40 dB

Fig. 6 Unwrapping phase error curves with different intensity amplitudes and signal-to-noise ratios. (a)–(d) Signal-to-noise ratios are 25, 30, 35, and 40 dB, respectively

为 45~55 dB,随着 CMOS 制造工艺的进步,一两千元左右的 CMOS 工业相机的信噪比通常可达 35 dB 以上,因此初步提出快速高动态范围三维重建条纹投影方法:无需多次寻找最佳的未饱和投影条纹强度幅值,取其中任意一组条纹图即可达到几乎同样的测量精度。

3 不同投影条纹幅值相位测量实验及分析

为了进一步实验验证投影不同光栅条纹幅值时的

相位恢复精度,针对第 2 节的仿真实验,进行了实验系统的搭建,采用了腾聚 TJ50 三维扫描专用数字投影仪、大恒的水星系列 CMOS 黑白工业相机 MER-231-41U3M(信噪比为 41 dB)和计算机,实验系统如图 8 所示。

3.1 不同投影条纹幅值相位测量实验

根据上节仿真结果可知,当投影不同强度幅值的正弦光栅条纹图时,对同一信噪比的相机,相位解包裹恢复精度几乎不变。对于实际被测表面上的某一固定

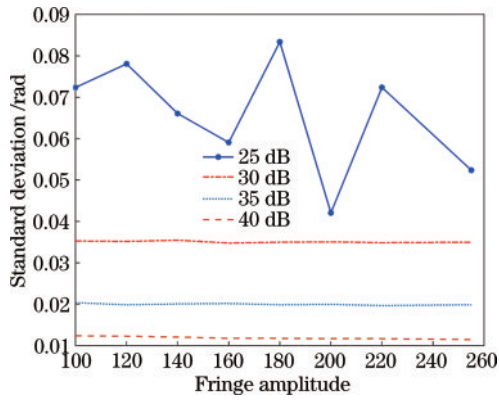


图 7 不同信噪比和条纹幅值时的相位误差标准差曲线
Fig. 7 Standard deviation curves of phase error with different signal-to-noise ratios and fringe amplitudes

点,其反射率近乎常数,为了验证不同投影条纹强度幅值对相位恢复精度影响程度,首先向被测对象(白纸平面)投影条纹强度幅值分别为 100、120、140、160、180、220、255 的 4 步相移多频正弦光栅条纹图,利用大恒图像和普通工业相机 MER-231-41U3M 分别采集不同投影条纹幅值时的调制条纹图,进行相位解包裹之后得到解包裹相位。然后向被测对象投影光栅条纹幅值为 255 的 20 步相移条纹图,对采集得到的调制条纹图进行相位解包裹,得到的解包裹相位为标准相位。最后求得不同投影条纹幅值时的解包裹相位与标准解包裹相位差,作为解包裹相位误差,根据解包裹相位误差,分析向被测对象投影不同条纹强度幅值时的相位误差变化情况,图 9 为由该实验系统采集得到的投影不同幅值光栅条纹图。

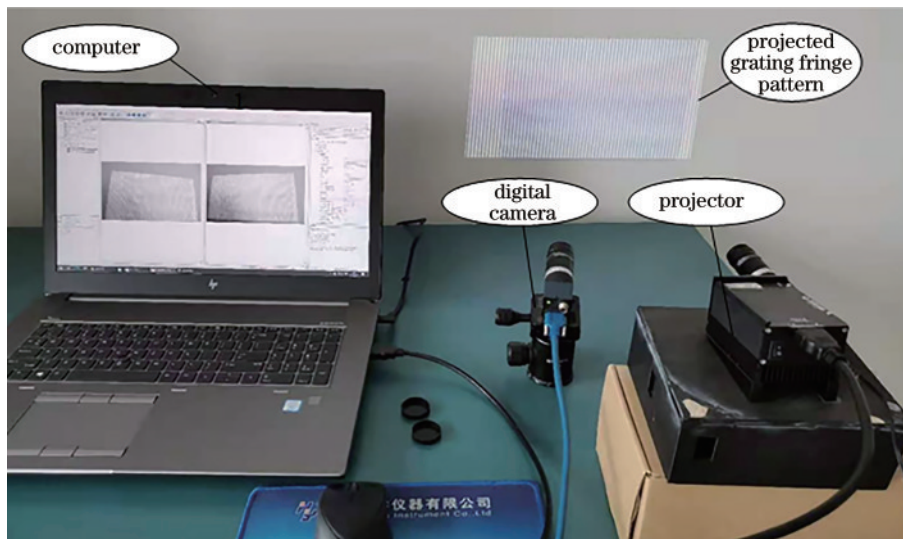


图 8 实验系统
Fig. 8 Experimental system

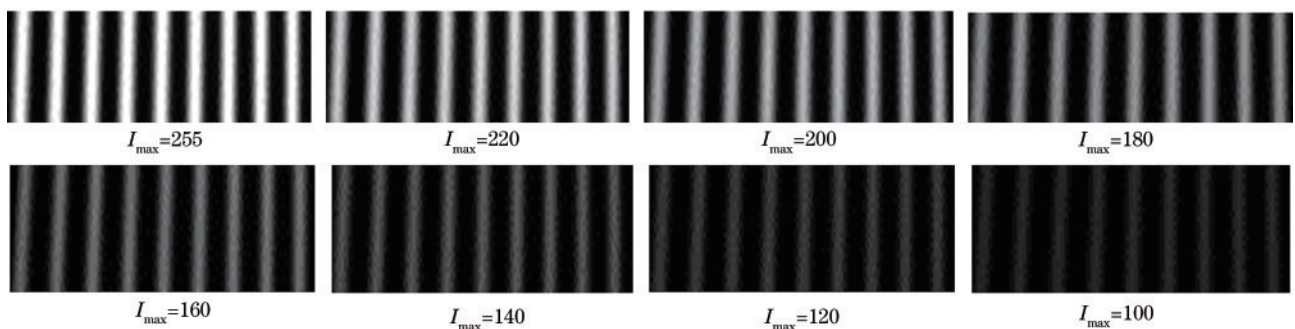


图 9 实验采集所得不同幅值条纹图
Fig. 9 Fringe patterns with different amplitudes obtained from experiments

3.2 实验结果及分析

利用上述实验装置对所采集的光栅条纹进行处理,调整不同的采集时间、光圈,使图像投影处于最佳状态,经过多次实验,得出解包裹相位、相位误差、相位误差的方差值等,实验结果基本一致。对频率为 4 的解包裹相位值进行放大如图 10 所示,可以看出幅值为 255 的光栅条纹解包裹相位值与其他幅值光栅条纹解

包裹相位值相比误差较大。图 11 为不同幅值条纹的相位误差曲线,由图可以看出,幅值为 255 的条纹幅值误差最大,去掉幅值为 255 的光栅条纹误差曲线如图 12 所示,则各个不同幅值条纹图的相位误差区域接近。表 2 为不同幅值条纹相位误差的某一行相位方差值。

根据上节仿真结果以及本节实验相位解包裹误差

表 2 不同强度幅值条纹的相位误差标准差

Table 2 Standard deviation of phase errors under different fringe intensity amplitudes

Fringe intensity amplitude	100	120	140	160	180	200	220	255
Standard deviation	0.0615	0.0618	0.0619	0.0618	0.0616	0.0629	0.0624	0.0740

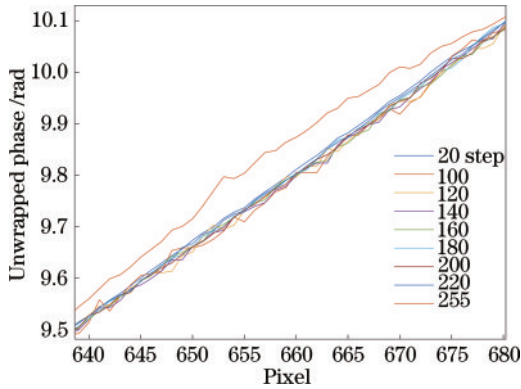


图 10 频率为 4 时不同条纹幅值的解包裹相位值

Fig. 10 Unwrapped phases of different fringe amplitudes at $f = 4$

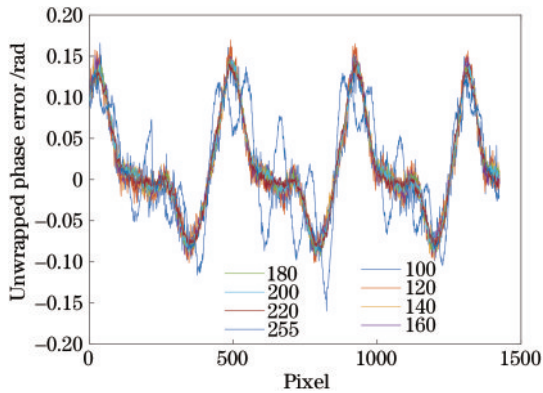


图 11 不同条纹幅值的相位误差曲线

Fig. 11 Phase error curves of different fringe amplitudes

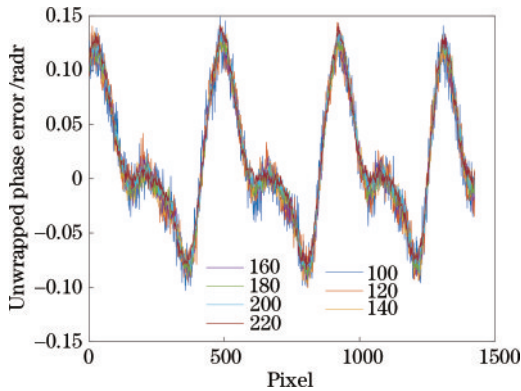


图 12 不含强度幅值为 255 时的相位误差曲线

Fig. 12 Phase error curves excluding intensity amplitude of 255

结果图 13 分析可知,如果初始设计光栅条纹图的强度幅值超过 235,对于一般的工业相机,相位解包裹的误差及其标准差比较大。但是当强度幅值处于 100~240 之间的光栅条纹投影图,根据图 12 和图 13 可知,在一定范围内,对于变化的条纹投影强度幅值,相位误差及其标准差的大小趋于稳定。

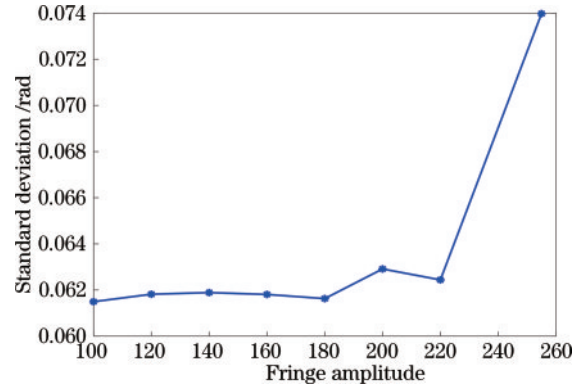


图 13 不同投影条纹幅值时相位误差标准差分布曲线

Fig. 13 Standard deviation curve of phase error with different projection fringe amplitudes

3.3 高动态被测表面测量方法的提出

根据前述仿真和实验结果,采集条纹图未饱和时,不同幅值的条纹图相位恢复误差及标准差基本相同。本文提出一种新的条纹投影快速高动态范围三维重建方法:对不同位置处含有不同反射率的被测表面,无需进行不同条纹幅值投影的复杂实验来选取合适的最佳未饱和投影条纹强度幅值,仅需投影两种不同幅值大小的条纹图。对于低反射率被测表面,可以在 200~250 之间(根据相机的信噪比和被测表面反射率大小的估计)适当选取一个条纹强度幅值进行投影即可进行相位恢复;对于反射率比较大的被测表面,可在 160~200 之间选取一个条纹幅值即可,利用小幅值的条纹图进行相位恢复以避免饱和,最后对两次三维测量结果进行融合,得出被测表面完整的三维形貌。既不影响测量精度,又提高了测量效率。如果被测表面反射率相差不太大,可以仅投影一组同一幅值的条纹图即可进行相位恢复。

根据以下方法进行表面反射率高低的快速计算与判断。首先向被测对象投影单一灰度值为 I^p 的均匀亮度图,然后采集被测对象图像为 I^c ,根据前面 2.2 节式(5)及其分析结果,可知 $I_n^c(x, y) \approx \rho t I_n^p(x, y)$,对于同一测量系统,系统参数设置之后,相机灵敏度 ρ 、图像采集时间 t 为常数,若投影灰度 I^p 为一固定值,则 I^c 随着表面反射率 r 的变化而变化, ρ, t 归一化为 1,则有

$$I^p = A, \quad (6)$$

$$I^c = \rho t r I^p = r I^p, \quad (7)$$

可得归一化 r 值为

$$r = \frac{I^c}{I^p}. \quad (8)$$

可向被测对象投影强度为 240 的灰度图像(根据

经验,投影强度大于 240 时容易饱和),当求得被测对象上某些点的反射率 $r > 1$ (饱和或接近饱和) 时,可认为该位置处为高反射率,当 $r < 0.6$ 时为低反射率。当被测对象表面反射率值均为 $0.6 \leq r \leq 1$ 时,可仅投影单一强度条纹幅值 250。

条纹投影法高动态范围表面三维测量步骤如下:

1) 生成单一强度值为 240 的图案,并向一张白纸表面投影;

2) 调整相机的曝光时间、焦距、光圈大小等,使采集图案灰度值近似为 240;

3) 向被测高动态范围表面投影该强度值为 240 的图案;

4) 相机采集被测表面图像并根据式(8)计算归一化后的 r 值;

5) 判断被测表面 r 值,并根据表 3 中 r 值的范围设置不同的光栅条纹幅值。

表 3 不同 r 值时的最佳条纹幅值

Table 3 Best fringe intensity amplitude with different r

r	$r < 0.6$	$0.6 \leq r \leq 1$	$r > 1$	$r < 0.6, 0.6 \leq r \leq 1$	$0.6 \leq r \leq 1, r > 1$	$r < 0.6, 0.6 \leq r \leq 1, r > 1$
Amplitude	255	250	200	250	250, 200	250, 200

4 高动态三维表面测量实验

4.1 实验系统

为了验证本文所提方法的有效性,对表面反射率变化比较大的不规则机械零件进行表面三维面型测量。实验系统采用数字相机、数字投影仪、三脚架、计算机,搭建实验装置如图 8 所示,被测对象为表面反射率比较低的三坐标测量机压板和表面非常光滑、反射率比较高的内测千分尺标准件,如图 14 所示。

4.2 实验结果

利用所搭建的实验系统,根据 3.3 节所述步骤,得

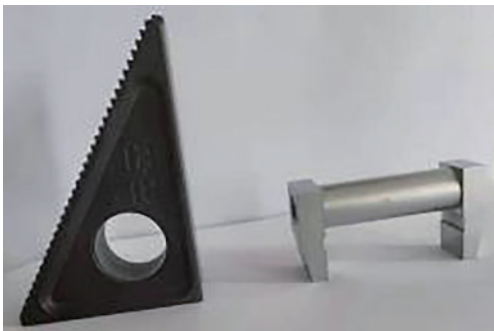


图 14 被测高动态范围对象

Fig. 14 Measured object with high dynamic range

出被测对象表面的归一化反射率在区间 $r < 0.6$, $0.6 \leq r \leq 1$, $r > 1$ 的个数分别为 50214、1594、19199 个,因此调整投影光栅条纹的强度幅值分别为 250 和 200。根据目测可知该被测表面反射率变化比较大,可以无需进行表面反射率的计算,直接采用投影条纹幅值 250 和 200。由工业数字相机采集得到两种光栅条纹调制图,图 15(a) 和 15(b) 分别为投影条纹强度幅值为 200 和 250 时采集的调制条纹图。从图中可以看出,投影的条纹强度幅值较高时,对反射率较高的被测对象表面会引起图像饱和现象;投影较低条纹强度幅值时,对反射率较低的被测对象表面会形成曝光不足现象,两种情况下的条纹均无法单独完全恢复相位。通过对采集的变形条纹图进行相位解包裹,进一步根据系统标定结果进行三维点云恢复,得到三维点云如图 16 所示。图 16(a)、16(b) 分别为投影暗条纹和投影亮条纹时的三维重建结果,据图 16 可知,投影暗条纹时,较低反射率表面无法恢复三维点云;投影亮条纹时,高反射率表面恢复的三维点云数据误差较大。去除杂点并进行数据融合的三维点云结果如图 16(c) 所示,可以看出,融合后点云比较完整。但是对内测千分尺中接近镜面反射的部分高低强度投影条纹均饱和,无法恢复相位及三维点云。

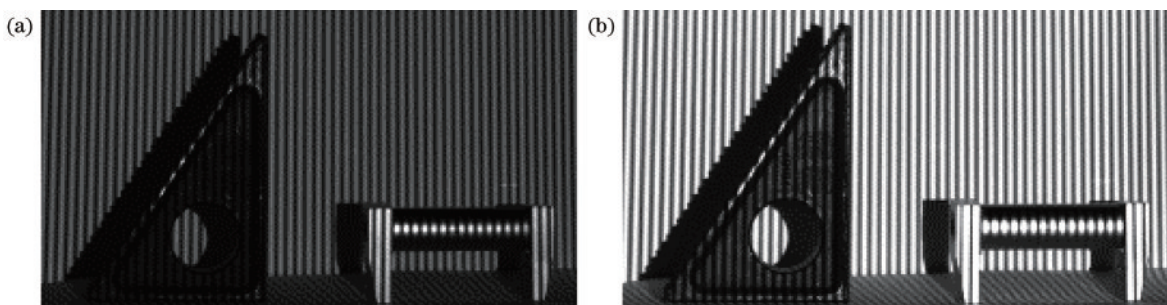


图 15 不同投影条纹强度幅值时的采集条纹图。(a) $I_{\max} = 200$; (b) $I_{\max} = 250$

Fig.15 Captured fringe patterns with different intensity amplitudes of projected fringe. (a) $I_{\max} = 200$; (b) $I_{\max} = 250$

4.3 实验总结

根据实验测量结果,利用相移法光栅条纹投影对表面反射率变化比较大的被测对象进行三维形貌测量

时,通常情况下目测即可判断出表面反射率的大小,无需提前进行被测对象表面反射率的精确计算,也无需进行复杂实验来获取最佳投影条纹强度幅值。利用投

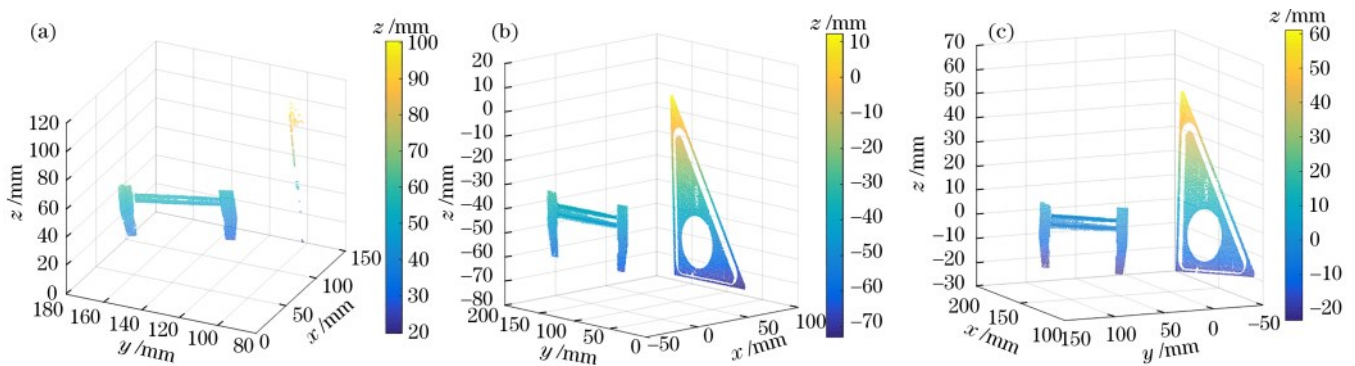


图 16 被测对象表面三维点云。(a)投影低幅值条纹时;(b)投影高幅值条纹时;(c)两次测量融合后

Fig. 16 3D point cloud of measured object surface. (a) When projecting low amplitude fringes; (b) when projecting high amplitude fringes; (c) fused measurements

影两种不同强度幅值的光栅条纹图:对高反射率被测对象表面利用较低强度幅值的光栅条纹图进行相位恢复,对低反射率被测对象表面利用较高强度幅值的光栅条纹图进行相位恢复,通过图像融合即可得到较完整准确的表面三维点云测量结果。根据仿真和实验结果,投影光栅条纹的两个强度幅值通常在 160~200 和 200~250 区间各选择一个强度幅值。对于具有更高反射率的被测物体表面,为了得到更完整的被测对象表面三维点云,可以适当增加投影仪或相机个数,或者对三维测量系统中的投影仪-相机测量角度进行调整,改变其相对位置,使类镜面反射尽量消失。

5 结 论

根据相移法三维形貌测量的相位恢复理论计算方法,进行了不同信噪比下不同条纹强度幅值的相位恢复仿真实验,并搭建实验系统进行了实验。根据理论计算、仿真和实验结果,提出仅使用一种或两种不同投影条纹强度幅值的高动态范围表面测量方法。最后通过实验验证该方法可对高动态范围表面进行准确测量,无需提前对被测表面反射率进行多次测量及最佳投影条纹强度的实验。在不影响测量精度的情况下,提高了测量速度,并为最近提出的单个投影周期内两次采集条纹图的高动态范围高速测量技术提供了理论和实验依据。测量系统的放置位置、相机与投影仪的角度均对测量精度、采集图像饱和情况有影响,为了完全消除高动态范围表面的饱和部分,应进一步研究相机与投影仪放置不同角度与测量精度和消除饱和位置的关系。

参 考 文 献

- [1] Lim J, Ayoub A B, Psaltis D. Three-dimensional tomography of red blood cells using deep learning[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(2): 026001.
- [2] Zhang Z H, Chang C X, Liu X H, et al. Phase measuring deflectometry for obtaining 3D shape of specular surface: a review of the state-of-the-art[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(2): 020903.
- [3] Zhang S. Rapid and automatic optimal exposure control for digital fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106029.
- [4] Liu X J, Chen W Y, Madhusudanan H, et al. Optical measurement of highly reflective surfaces from a single exposure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1882-1891.
- [5] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. High dynamic range 3D shape measurement based on time domain superposition [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(6): 065004.
- [6] 张炜. 航空发动机叶片复杂曲面轮廓测量关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 73-82.
Zhang W. Research on the key techniques for complex curved profile measurement of aero-engine blades[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 73-82.
- [7] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Adaptive pixel-to-pixel projection intensity adjustment for measuring a shiny surface using orthogonal color fringe pattern projection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(5): 055203.
- [8] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 56-71.
- [9] Wang J H, Zhou Y G, Yang Y X. A novel and fast three-dimensional measurement technology for the objects surface with non-uniform reflection[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102878.
- [10] Liu Y Z, Fu Y J, Cai X Q, et al. A novel high dynamic range 3D measurement method based on adaptive fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106004.
- [11] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [12] Wang Y J, Zhang J, Luo B. High dynamic range 3D measurement based on spectral modulation and hyperspectral imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34442-34450.

- [13] 汪锦航, 卢荣胜, 刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1912001.
Wang J H, Lu R S, Liu D M. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1912001.
- [14] Chen B, Zhang S. High-quality 3D shape measurement using saturated fringe patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 83-89.
- [15] Jiang C F, Bell T, Zhang S. High dynamic range real-time 3D shape measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7337-7346.
- [16] Wang M M, Du G L, Zhou C L, et al. Enhanced high dynamic range 3D shape measurement based on generalized phase-shifting algorithm[J]. Optics Communications, 2017, 385: 43-53.
- [17] Hu Q Y, Harding K G, Du X M, et al. Shiny parts measurement using color separation[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6000: 125-132.
- [18] 陈超, 高楠, 王向军, 等. 基于自适应条纹投影的彩色物体三维形貌测量[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815008.
Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Three-dimensional shape measurement of colored objects based on adaptive fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815008.
- [19] Liu Y Z, Fu Y J, Zhuang Y H, et al. High dynamic range real-time 3D measurement based on Fourier transform profilometry[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106833.
- [20] 陈超文, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 基于多视方程的高反光物体表面三维形貌测量[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212002.
Chen C W, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three-dimensional shape measurement of shiny surface based on multi-view equation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212002.
- [21] Salahieh B, Chen Z Y, Rodriguez J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 10064-10071.
- [22] Zhu Z M, You D D, Zhou F Q, et al. Rapid 3D reconstruction method based on the polarization-enhanced fringe pattern of an HDR object[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2162-2171.
- [23] Yu J, Gao N, Zhang Z H, et al. High sensitivity fringe projection profilometry combining optimal fringe frequency and optimal fringe direction[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106068.
- [24] Liu X H, Zhang Z H, Gao N, et al. 3D shape measurement of diffused/specular surface by combining fringe projection and direct phase measuring deflectometry [J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27561-27574.
- [25] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [26] Xie K, Liu W G, Zhou Q, et al. Real-time phase measurement and correction of dynamic multimode beam using a single spatial light modulator[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(1): 011404.
- [27] Suresh V, Wang Y J, Li B W. High-dynamic-range 3D shape measurement utilizing the transitioning state of digital micromirror device[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 176-181.
- [28] Zheng Y, Wang Y J, Suresh V, et al. Real-time high-dynamic-range fringe acquisition for 3D shape measurement with a RGB camera[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(7): 075202.
- [29] Suresh V, Li B W. High-speed high dynamic range 3D shape measurement with digital micro-mirror device[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10932: 109320G.
- [30] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. Real-time high dynamic range 3D measurement using fringe projection[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24363-24378.