

高反光对象表面的结构光三维成像方法

郑宏博¹, Yo-Sung Ho², 刘凯^{1*}

¹四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

²韩国光州科技大学电气工程及计算机科学学院, 韩国 光州 61005

摘要 为了改善高反光对象表面的三维重建的质量,提出了一种基于二值相移编码光栅投影的相位融合算法。该算法对饱和和相位误差进行分析,利用二值相移投影图案的周期性与对称性实现了饱和和相位误差的检测。研究结果表明,相比于基于光照强度判断的饱和误差检测方法,所提方法可以准确检测出存在饱和误差的区域。与修复前相比,修复后的饱和和相位误差的均方根值减少了 95.7%,最大相位误差减少了 96.1%。与传统的检测方法相比,在使用更少测量组的情况下,替换后的饱和和相位误差的均方根值减少了 16.7%。所提方法可以有效地重建出高反光物体的表面轮廓,且精度更高,无需非线性校正,抗干扰能力强。

关键词 测量; 相位测量轮廓术; 二值相移编码; 光强度饱和; 相位误差

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051202

Three-Dimensional Imaging Method of High-Reflective Objects Based on Structured Light

Zheng Hongbo¹, Yo-Sung Ho², Liu Kai^{1*}

¹ College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

² School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

Abstract In order to improve the accuracy of three-dimensional reconstructed high-reflective surfaces, a phase fusion algorithm is proposed based on binary phase-shifting encoding. The phase error caused by the intensity saturation is analyzed and detected based on the periodicity and symmetry of the binary phase-shifting projection patterns. The research results demonstrate that, compared with the saturation error detection method based on the illumination intensity estimation, the proposed method can more accurately detect the areas with saturation phase errors. Compared with the result before correction, the root mean square error of the corrected phase shows a 95.7% reduction in the saturation phase errors and a 96.1% reduction in the maximum phase error. Compared with the traditional detection methods, the root mean square value of the replaced saturation phase error is reduced by 16.7% when fewer measurement groups are used. The results show that the proposed method can effectively reconstruct the surface profile of high reflective objects. The proposed method doesn't need nonlinear correction, and is of strong anti-noise ability.

Key words measurement; phase measuring profilometry; binary phase-shifting encoding; light intensity saturation; phase error

OCIS codes 120.5050; 120.2830; 100.2650

1 引言

相位测量轮廓术(PMP)是一种基于结构光测量

技术(SLI)的三维(3D)重建技术^[1],具有灵活、高精度,以及非接触性等优点^[2-4],被广泛应用于三维建模、自动化制造、产品质量检测,以及生物识别等领

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(61473198)、四川省科技厅重点研发项目(2018GZ0198)、成都市科技局重点研发支撑计划(2018-YFYF-00029-GX)

* E-mail: kailiu@scu.edu.cn

域^[5-7]。在实际应用中,需要照相机准确获得被测物体被投影编码图案时的反射光作为求解相位的依据,常用的编码图案有线、条纹、棋盘格及圆点等^[8-9]。由于类镜面物体具有表面光滑,反射率大等特征,捕获的图片中部分光强度极高的区域像素的光强度被限制在照相机的最大量化值,即光强度饱和^[10]。光强度饱和会引起饱和区域的像素信息失真^[11],导致解相位的准确性下降,严重影响了三维测量的精度^[12]。

针对这一问题,赵婧等^[13]建立了每个饱和像素点各帧光强值的数学模型,使用在未饱和时的光强值计算相位,该方法仅能抑制光强饱和造成的误差,但却不能消除误差。Zhang 等^[14]提出一种高动态扫描技术,通过查找饱和像素在其他帧中的未饱和最大强度值进行图像融合,此方法耗时较长,需要调节多组曝光值,进行多次扫描实验。Long 等^[15]在 Zhang 的基础上改用像素的 k 次谐波大小来判断是否饱和,减少了图像模糊和随机噪声带来的影响,但是该方法需要人为设置判断是否饱和的阈值,而对不同的扫描对象,阈值的大小也不同,故而阈值设置受阻。Waddington 等^[16]则是根据环境光的强度改变投影的正弦波的最大灰度值,但是该方法需要预先在黑暗的环境中校准,适用的场景较少。Lin 等^[17]提出了一种自适应的数字条纹投影技术,通过两次预扫描自适应地调整实验时投射图案的光强值,该方法与图像融合的方法相比,扫描速度较快但是精度有所下降。Feng 等^[18]提出了一种将标准三步相移条纹图与数字散斑图像相结合的新的条纹投影方法,该方法扫描速度快,可以扫描动态物体,但需要双目摄像机来匹配高光强区域,对硬件的要求较高。Chen 等^[19]通过投影图案的周期与相移步数之间的关系提出了一种基于饱和调制图案的相位计算方法,该方法简单有效,其不足之处是无法检测饱和区域,且当被测物表面反射率极高,获取的相移图案不准确时,无法使用该方法。Chen 等^[20]提出了一种根据表面反射率自适应地调整投影强度的方法。该方法测量精度较高,但实现过程较为复杂,需要摄像机从不同角度获取被测物的调制图案。

为了能够准确识别饱和区域,减少饱和误差,本

文提出了一种基于二值相移编码投影图案的相位融合算法。该方法通过投影二值相移图案,由同一频率下不同帧的光强度的大小判断是否饱和,并使用相位融合算法进行修复。二值相移图案与传统的正弦图案相比,其抗干扰能力更强,适合对高动态范围的物体进行扫描^[21]。与传统的图像融合算法相比,该算法不仅能更加灵活有效地检测饱和区域,减少计算量,也能很好地修复光强饱和引起的相位误差。

2 基本原理与方法

2.1 二值相移编码重建原理

经典 PMP 测量方法是通过向被测物表面投影一组定量相移的正弦光栅,并由照相机同步捕获调制后的光栅图像,进行处理得到相位^[22]。Ekstrand 等^[23]投影具有相移的二值编码图案,使用传统 PMP 方法求解相位。刘凯等^[24]归纳出了一种结构光周期编码的统一解码方法,并证明在频率足够高时,不同周期图案的相位误差接近。针对正弦光栅在扫描高光物体表面时易受到亮度干扰,投影速度较慢且需要非线性校正的问题,使用二值相移编码图案替代,图案由黑白两种条纹组成,投影的图案表示为

$$I_n^p(x^p, y^p) = \frac{B^p}{2} \left\{ 1 + \operatorname{sgn} \left[\cos \left(\frac{2\pi f y^p}{H} - \frac{2\pi n}{N} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: I_n^p 为投影图片的灰度值; (x^p, y^p) 为像素点在投影仪中的坐标; B^p 为灰度调制幅度; $\operatorname{sgn}[\cdot]$ 为符号函数; f 为编码图片的频率; H 为图片的高度; 整数 n 为相移索引且满足 $n=0, 1, \dots, N-1$ 为统一频率下相移的次数,也是编码图片的总数。根据拓扑原理,照相机拍摄的被测物表面调制的图片表示为

$$I_n^c(x^c, y^c) = \frac{B^c}{2} \left\{ 1 + \operatorname{sgn} \left[\cos \left(\phi(x^c, y^c) - \frac{2\pi n}{N} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: I_n^c 为捕获图片的灰度分布, (x^c, y^c) 为像素点的照相机坐标; B^c 为像素 (x^c, y^c) 的灰度调制幅度; ϕ 为该像素点的相位。 B^c 的计算公式为

$$B^c(x^c, y^c) = \frac{2}{N} \sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x^c, y^c) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x^c, y^c) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right]^2}. \quad (3)$$

理想情况下,对于每一个像素点,其灰度分布形

成了周期方波,根据傅里叶变换,任何周期信号都可

以表示为正余弦信号的叠加,对像素点灰度值的时间序列做离散傅里叶变换可得:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \exp(-j \frac{2\pi n}{N} k), k=0,1,\dots,N-1, \quad (4)$$

式中 X_k 为像素点灰度值时间序列的谐波成分, k 为谐波的阶次,除去 $k=0$ 时的直流分量,每一个谐波成分都可以表示为正余弦信号的形式,而由于基频有最大的调制幅值,选取 $k=1$ 时进行解码,公式为^[24]

$$\phi(x^c, y^c) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x^c, y^c) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c(x^c, y^c) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \right]. \quad (5)$$

在获得被测物的相位信息后,通过结构光测量系统标定获得的投影设备和摄像设备之间的标定信息,就可以恢复被测物表面的三维数据^[25]。

2.2 饱和误差分析

在理想情况下,单个像素的图像强度值可以被照相机正确记录,然而实际上,由于某些扫描对象表面反射率过高等原因,实际的强度值大于照相机的最大量化值。两者之间的关系可以表示为

$$\Delta I = \begin{cases} 0, I_n^i \leq T \\ I_n^i - T, I_n^i > T \end{cases}, \quad (6)$$

式中: I_n^i 为光栅图像的理论强度值; T 为照相机的最大量化值 $T=2^b-1$,其中 b 为照相机的量化等级。联立(5)式和(6)式,可得光照饱和产生的相位误差为^[24]

$$\Delta\phi \approx \left| -\frac{2}{NB^c} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\Delta I \sin\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right) \right] \right|. \quad (7)$$

如果编码图案的光强小于 0 或大于 255,会产生测量误差,甚至导致测量失败。分析(7)式可知,由光照饱和造成的误差既与照相机获取的图像的光强调制有关,也与投影仪投射的光栅图片的数量 N 有关。

2.3 饱和像素检测与相位融合算法

在传统的图像融合算法中,当像素点的光强值达到照相机的最大量化值时就判断出现光强饱和,显然忽略了真实光强值的情况,也就造成了很多像素点的误判,增加了计算量。在传统的 PMP 方法中,照相机拍摄的非饱和区域的灰度值也非常容易受到光强饱和区域反射光的干扰。针对这一问题,二值相移编码方法只需要区分黑白两种区域,增

加了抗干扰能力,同时在编码中加入了高频成分,可以提高相位的精度。

由二值相移图案的周期性和对称性可知,同一频率下照相机捕获的 N 幅(N 为偶数)投影中索引为 n 的图像($n=0,1,\dots,N-1$)中的像素 $I_n^c(x^c, y^c)$ 与 $N/2$ 幅后的 $I_s^c(x^c, y^c)$ 的投影的光照强度相反,故而定义这样一组图像的饱和像素在光栅频率 f 的饱和强度 W_n 为

$$W_n(x^c, y^c) = \begin{cases} 2, |I_n^c(x^c, y^c) - I_s^c(x^c, y^c)| \leq U \\ 0, |I_n^c(x^c, y^c) - I_s^c(x^c, y^c)| > U \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $s=n+N/2$, U 为阈值,由于高反射率物体光照饱和强烈的区域会反射投影光源到照相机,无论投影黑或白条纹都会出现光照饱和,所以阈值一般可以设置为 1。当允许少量饱和误差时,可以增加阈值的大小。由(8)式可得,在同一频率 f 下的一组图像中,像素的饱和强度 W 的计算公式为

$$W(x^c, y^c) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} W_n(x^c, y^c). \quad (9)$$

由(9)式可知,当 $W(x^c, y^c)=N$ 时,意味着这个像素在 N 幅图片中全部饱和, W 的大小也反应了该像素的饱和程度与物体反射率的大小。根据 W 的大小,可以自主选择修复饱和的区域,为之后的相位融合减少了不必要的计算。为减少三维扫描重建所需的时间,在扫描前投影 G 组不同亮度的二值相移编码图案,照相机实时捕获的图像表示为 $I_n^{(g)}(x^c, y^c)$,由(8)式和(9)式可计算该组图像像素对应的饱和强度为 $W^{(g)}(x^c, y^c)$,其中 g 为组号。在实际重建过程中,因为投影图片包含多个频率,计算得到的相位也就包含了基频相位和高频相位,因此需要进行相位解缠绕。检测饱和区域的投影图片的频率 f 采用该组中的最大频率并用于后续的相位融合,采用高频相位是因为可以减少噪声的干扰,提高相位精度,且高频相位易受到光强度饱和的影响,由此检测的饱和区域更加准确。当出现饱和误差时,查找对应点的各组最小的饱和强度值,表示为

$$M(x^c, y^c) = \min\{W^{(g)}(x^c, y^c), g=1,2,\dots,G\}, \quad (10)$$

式中函数 $\min\{\cdot\}$ 为选取饱和强度最小的一组,而当没有饱和误差时,可知满足条件的不止一组,所以使用 M 表示满足条件的点所在图像序列的集合。为了正确地求解相位,需要选择满足条件的,光强度值最大的点所在的那一组,可以由下式表示:

$$R = \max\{M\}。 \quad (11)$$

函数 $\max\{\cdot\}$ 是取集合 M 中饱和强度相同的情况下光照强度最大的一组的序号, R 是将饱和像素替换后的像素所在图像序列的编号, 满足(11)式的像素的相位可以表示为

$$\phi(x^c, y^c) = \phi^R(x^c, y^c), \quad (12)$$

式中 ϕ 为替换后的相位, ϕ^R 为替换的强度最大且不饱和的像素的相位。

3 实验结果

通过实验验证算法的实际效果, 实验系统包含一台分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的 Prosilica GC650C 照相机, 一台分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 的 Casio XJ-A155V 的投影仪和一台用于控制设备和处理数据的电脑, 如图 1(a) 所示。采用一个不锈钢平板作为扫描对象, 平板表面光滑, 反射率较高。

利用(1)式生成最大强度为 255 的频率分别为 1, 4, 16 和 32 的二值相移编码图片各 30 张, 作为基础图案。随后生成最大强度依次递减 20 的二值相移图案, 直到最大强度为 55 的用于相位融合的图片组共 10 组。图案灰度值的间隔越小, 越能保证像素在不饱和的情况下的调制幅度最大化, 测量结果也就越准确。但是相应的投影的次数也随之增多, 需要采集的相移图案也就越多。在扫描表面较为平滑, 形状简单且易于检测的物体时, 间隔可以较大。依次投影生成的二值光栅图案, 并用照相机同步捕获。在每次投影后对投影的结果进行分析, 判断是否出现饱和区域, 如果没有则停止投影最大强度值

更低的相移图案。从图 1(b) 可以看出, 当投影最高强度为 255 的条纹图案时, 不锈钢板正对投影仪的区域出现光强度饱和。

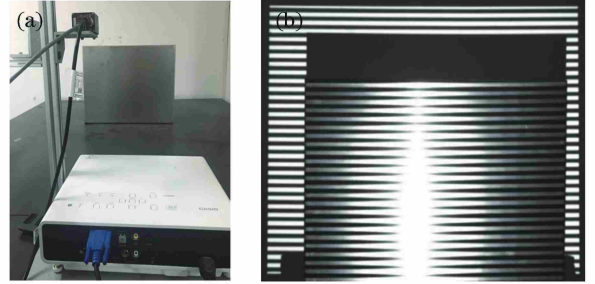


图 1 实验装置与结果。(a)扫描系统;(b)被测不锈钢板的一帧变形条纹

Fig. 1 Experimental setup and results. (a) Scanning system; (b) deformed fringe of stainless steel plate in one frame time

为了验证检测饱和误差区域算法的有效性, 利用强度值为 255 且频率为 32 的 30 张图片组确定饱和和像素, 如图 2(a) 所示, 右边的色度条表示该像素的饱和强度即(9)式中的 W , 其大小是每组图像出现饱和的次数。图 2(b) 为传统检测光照饱和区域的方法, 即当像素强度达到 255 时标记为饱和, 对比两图可知, 传统的基于像素强度值判断是否饱和的方法将很多没有出现饱和相位误差或者误差非常小的像素误判为需要被替代的存在误差的像素(图 3), 而本文的方法不仅可以准确检测出在投影二值相移图案进行三维重建时存在饱和误差的区域, 还可以检测出本没有被投影图案调制, 而由于临近的高反射率区域干扰而产生误差的区域, 比如图 2(a) 中钢板上方的区域。

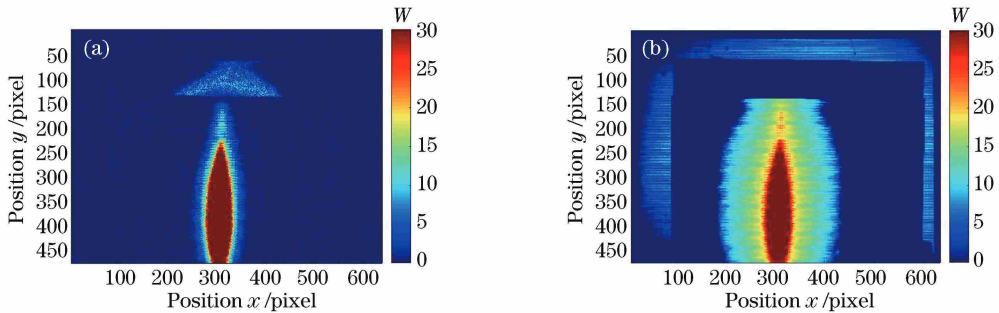


图 2 饱和区域检测。(a)所提算法;(b)传统算法

Fig. 2 Detection of saturation region. (a) Proposed method; (b) conventional method

为了验证检测方法的有效性, 使用光照强度较低且数量相同的扫描图案, 以未出现饱和现象的扫描结果与由光强度饱和而产生相位误差的扫描结果作为对照组, 分析出现相位误差的区域, 如图 3 所

示。图片右侧的颜色栏表示相位误差。可以看出, 相位误差与本文提出的饱和误差区域检测算法检测出的误差区域一致。

使用传统的 PMP 算法, 选取投影频率依次为

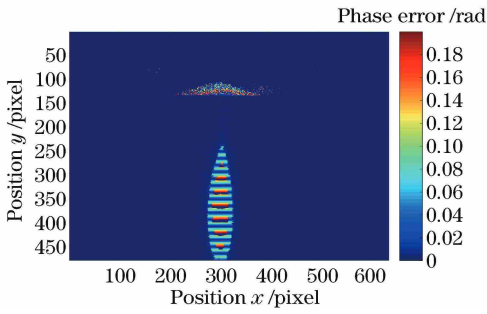


图3 相位误差
Fig. 3 Phase error

1, 4, 16 和 32 的编码图片各 30 张, 总计 120 张, 实验结果如图 4(a) 所示, 可以看出, 当出现大面积光饱和区域时, 传统 PMP 的重建结果较差。针对单一扫描组无法解决的饱和区域, 使用本文算法, 以未饱和的实验组中像素的相位替代原饱和区域的相位, 重建结果如图 4(b) 所示。实验结果表明, 即使

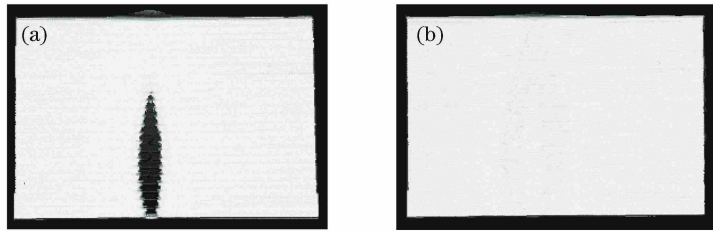


图4 三维重建结果。(a)传统 PMP 算法;(b)所提算法

Fig. 4 Results of 3D reconstruction. (a) Conventional PMP algorithm; (b) proposed method

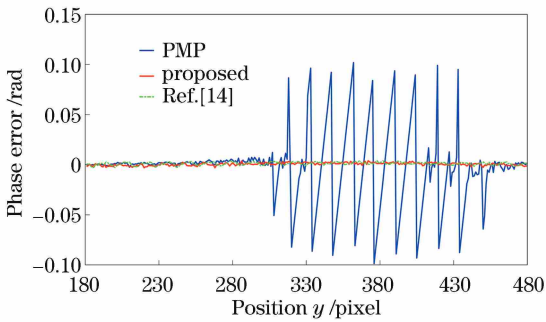


图5 第 320 列相位误差

Fig. 5 Cross-section phase error at the 320th column

由表1可知, 本文方法有效减少了在测量高反

表1 不同方法的相位误差比较

Table 1 Comparison of phase errors by different methods

Method	RMS of phase errors / rad	Max phase error / rad
PMP	0.0351	0.1018
Ref. [14]	0.0018	0.0043
Proposed	0.0015	0.0040

对于饱和和误差较大的区域, 本文方法也可以进行有效地识别与重建。

4 分析与讨论

图 5 中显示了不同方法下重建不锈钢板第 320 列的相位误差, 真实相位由未出现饱和的相位进行直线拟合得到。蓝色实线是相同相移下的传统 PMP 算法的重建结果, 绿色虚线为使用文献 [14] 中的饱和像素处理方法重建的结果, 即选取光强度最大且不饱和的像素的灰度值代替原饱和像素, 红色实线为本文提出的相位融合算法修复后重建相位误差。如表 1 所示, 修复前相位误差的均方根(RMS)值为 0.0351, 利用本文算法修复后的相位误差 RMS 值为 0.0015, 修复后比修复前相位误差减少了约 95.7%, 最大相位误差减少了 96.1%。

光物体表面时因光照强度饱和而造成的饱和相位误差, 大幅提高了实验精度, 并且也验证了本文算法对存在饱和和误差区域检测方面的有效性。本文算法检测到当投影最大强度值为 95 的二值图案时, 存在饱和和误差的区域消失, 而传统方法在投影最大强度值为 55 的投影图案时仍然能检测到饱和和像素, 还需要继续投影最大强度值更小的图案完成重建。但投影亮度过低会降低像素的信噪比与灰度调制幅度 B^c , 增加相位误差。与文献 [14] 的饱和像素处理方法相比, 本文算法是通过分析在二值相移图案的解码过程中是否存在饱和误差从而判断像素是否饱和, 并非简单的通过灰度值判断, 所以其结果更直接、准确。与传统方法相比, 本文算法无需检查像素在所有图片中是否饱和, 通过引入阈值来判断是否饱和的方法可以减少被判断为饱和的像素的数量, 所以投影次数更少。

在饱和区域检测的方法中, 除了使用像素的强度值, 还经常使用像素的调制度, 即 (2) 式中的 $B^c(x^c, y^c)$ 来检测像素是否饱和, 如文献 [10] 与文

献[15]中所使用的方法。在相同实验条件下利用(3)式计算 $B^c(x^c, y^c)$ 的值,结果如图6所示。

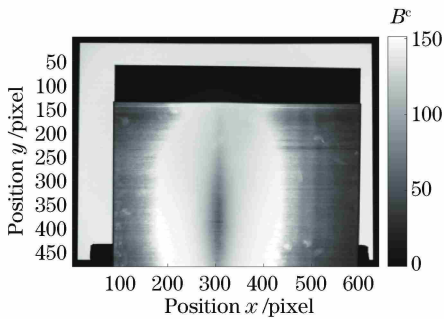


图6 基于光强调制的饱和区域检测

Fig. 6 Detection of saturation regions based on intensity modulation

由(3)式可知,当像素的强度值在图片组中的每张图片中都很大且相近时,调制度反而会变小,反映在图6中就是实际中亮度最高的正对投影仪的区域的调制度的值反而小于其周围的像素,因此可以检测出该区域为饱和区域。但基于调制度的检测方法的准确性依赖于阈值的选择,同时在饱和与曝光不足这两种情况下均会造成调制度的值较小,因此需要额外区分当前区域是背景,曝光不足的区域还是饱和区域。本文算法是通过比较物体表面在分别投影黑白条纹下的灰度值的大小,来判断是否出现饱和和误差,而无需针对不同的被测物体设定阈值进行饱和判断。在相位计算方面,与基于调制度的饱和区域检测方法不同的是,使用本文的方法检测出的饱和像素必然会存在饱和引起的相位误差,而调制度并不直接参与相位的计算,因此无法单从调制度的大小判断是否存在饱和和相位误差。为了实现高反光对象表面的三维重建,使用基于二值相移图案的饱和区域检测方法无需设置判断是否饱和的阈值且更有利于之后对存在饱和和误差的相位的替换。

为了验证本文方法的适用范围,证明其对外形更为复杂的被测物体的有效性,对剪刀进行三维重建,效果如图7所示,可以看出,对于不同材质的部分,重建效果依然比较理想,验证了本文方法的有效性。

利用二值图案代替传统正弦图案可以提升测量速度,且抗干扰能力强,无需非线性校正。以DLP LightCrafter 4500投影仪为例,可以实现高达4225 frame/s的二值图形投影速率,而与之相应的投影8位灰度图形的速率只有120 frame/s。可以看出,所提方法在实际应用中可以大大减少扫描所

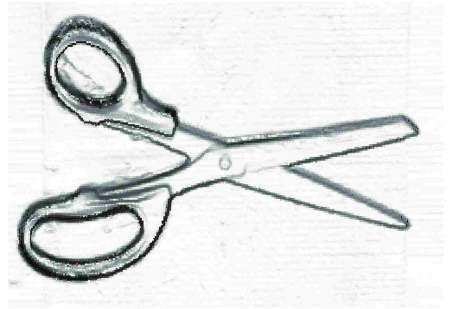


图7 剪刀的三维重建结果

Fig. 7 3D reconstruction result of scissor

需的时间。

5 结 论

对于传统PMP方法在扫描高反光物体表面时出现部分区域光强饱和的情况,使用二值相移编码图案代替正弦图案。与正弦图案相比,二值图案投影速度更快,不易受到饱和像素干扰且无需非线性校正。对部分像素光强饱和造成的饱和相位误差较大的区域,利用二值相移图案的周期性与对称性,可以更加准确地检测出存在饱和和误差的区域,将原相位替换为较低光照强度下没有饱和和误差的相位,完成被扫描物体的三维重建。与传统的基于像素灰度值判断是否饱和的方法相比,所提方法在不影响测量精度的情况下避免了当灰度值的真值接近照相机最大量化值时,被误判为饱和像素的情况,减少了不必要的计算与相位误差。理论分析和实验结果表明:所提算法与传统的基于像素灰度值的检测方法相比能更准确地检测出存在饱和和相位误差的区域,减少了后续重建过程的计算量,并且通过相位融合的方法可以有效减少95.7%的饱和和相位误差,减少的最大相位误差高达96.1%。

参 考 文 献

- [1] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1989, 11(3): 185-215.
- [2] van der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 18-31.
- [3] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3D shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] Lilienblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3D surface reconstruction with a stereo

- line-scan system [C] // Proceedings of 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2014: 1171-1176.
- [5] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] Nguyen T T, Slaughter D C, Max N, *et al.* Structured light-based 3D reconstruction system for plants[J]. Sensors, 2015, 15(8): 18587-18612.
- [7] Cai Z W, Liu X L, Peng X, *et al.* Structured light field 3D imaging[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20324-20334.
- [8] Li C H, Zhang Y J, Han J T, *et al.* Asymmetric stripe adjustment method for stripe center extraction [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (5): 0504005.
李程辉, 张英杰, 韩江涛, 等. 应用于条纹中心提取的非对称条纹调整方法 [J]. 中国激光, 2017, 44 (5): 0504005.
- [9] Liu K, Wang J, Ho Y S. Unidimensional scalable method for structured light projection of 3D measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061202.
刘凯, 王江, Yo-Sung Ho. 三维测量结构光一维编码投影机的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061202.
- [10] Jiang H Z, Zhao H J, Li X D. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3D scanning technique for high-reflective surfaces [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1484-1493.
- [11] Wang Y R, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Autofocus evaluation function based on saturate pixels removing [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1210001.
王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和和像素剔除的自动对焦评价函数 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1210001.
- [12] 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.
- [13] Zhao J, Wang Y C, Liu K. New method of restraining the saturated error in phase measuring profilometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (10): 1008001.
赵婧, 王永昌, 刘凯. 一种抑制相位测量轮廓术饱和误差的方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008001.
- [14] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. Optical Engineering, 2009, 48 (3): 033604.
- [15] Long Y F, Wang S J, Wu W, *et al.* Accurate identification of saturated pixels for high dynamic range measurement[J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 043106.
- [16] Waddington C, Kofman J. Sinusoidal fringe-pattern projection for 3D surface measurement with variable illuminance[C] // Proceedings of 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010: 1-5.
- [17] 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.
- [18] Feng S J, Chen Q, Zuo C, *et al.* Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces [J]. Optics Communications, 2017, 382: 18-27.
- [19] Chen B, Zhang S. High-quality 3D shape measurement using saturated fringe patterns [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 83-89.
- [20] 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.
- [21] Xu X Y, Zhang X C, Xu M. Dynamic three-dimensional shape measurement for specular freeform surfaces with the quaternary orthogonal grid fringes [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10155: 101553Y.
- [22] Kang X, He X Y, Quan C. 3D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(12): 1444-1447.
康新, 何小元, Quan C. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理 [J]. 光学学报, 2001, 21(12): 1444-1447.
- [23] Ekstrand L, Zhang S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4518-4520.
- [24] Liu K, Zhong P. Universal decoding method for periodic wave patterns in structured light illumination [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28 (9): 28091001.
刘凯, 钟朋. 结构光周期图案的统一解码方法 [J].

- 强激光与粒子束, 2016, 28(9): 28091001.
- [25] Liu C, Gai S Y, Da F P. Sub-regional phase error compensation for structural light measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0604002.
- 刘超, 盖绍彦, 达飞鹏. 结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0604002.