

激光与光电子学进展

基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法

龙佳乐¹, 张建民^{1*}, 杜梓浩¹, 陈富健², 关浩源¹¹五邑大学智能制造学部, 广东 江门 529020;²深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 针对基于结构光投影的三维形貌测量, 提出了一种基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法。在波长选择的双条纹投影相位展开算法基础上增加了一张彩色条纹图, 将条纹图按颜色划分为不同的条纹区域。在不同的条纹区域中通过查找表方式对相位图进行相位展开操作。实验结果表明, 该算法具有测量范围广、计算量小、精度高以及速度快等优点, 能有效解决所选波长较短时查找表重复的问题。

关键词 几何光学; 颜色分割; 双波长条纹投影; 相位展开; 三维测量

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1708001

Dual-Wavelength Fringe Projection Correction Algorithm Based on Color Segmentation

Long Jiale¹, Zhang Jianmin^{1*}, Du Zihao¹, Chen Fujian², Guan Haoyuan¹¹Faculty of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, China;²School of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract Aiming at three-dimensional topography measurement based on structured light projection, a dual-wavelength fringe projection correction algorithm based on color segmentation is proposed in this paper. A color fringe image is added on the basis of the wavelength-selective dual-fringe projection phase unwrapping algorithm, and the fringe image is divided into different fringe regions by color. Phase unwrapping is performed on the phase map by means of a look-up table in different fringe regions. The experimental results show that the algorithm has the advantages of wide measurement range, small amount of calculation, high precision and fast speed. The experimental results show that the algorithm has the advantages of wide measurement range, small amount of calculation, high precision and fast speed, and can effectively solve the problem of repeated lookup tables when the selected wavelength is short.

Key words geometric optics; color segmentation; dual-wavelength fringe projection; phase unwrapping; three-dimensional measurement

1 引言

三维(3D)测量技术是结合计算机图像处理和精密测量的先进科学技术,也是当今社会智能制造行业的基础。获取三维物体的空间距离信息是三维成像、三维物体重建中的重要步骤之一,具有很大的实际应用价值^[1]。随着社会的不断发展以及科技的进步,高度分布随时间变化的动态物体三维形状测量在多个领

域中得到了人们的广泛关注和深入研究^[2]。三维测量方法主要分为接触式和非接触式三维测量方法^[3]。接触式三维测量方法在测量过程中会直接接触被测物体表面,容易破坏被测物体的形状,对测量造成干扰,从而影响被测物体的外观和性能,如:测试电子电路板时,接触式测量方法容易损坏电路板上的表层电路;对智能手机的玻璃触摸屏厚度进行检测时,接触式测量方法会对手机触摸屏的表面产生划痕。为了满足智能

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-09-24; 录用日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62075168)、2020广东省自然科学基金面上项目(2020A1515011088)、广东省高等院校重点领域专项(自然科学)项目(2019KZDZX1025)、广东省普通高校创新团队项目(2021KCXTD051)、2021江门市基础应用基础研究重点项目(2021030103730007331)、江门市科技计划(2020JC01034, 2020JC01028)

通信作者: *zjm99_2001@126.com

制造行业的生产需求,非接触式三维测量方法在光学成像的基础上,结合计算机图像处理技术和传感器与被测物体的几何关系进行测量,在测试过程中无需接触被测物体,有效避免了接触式测量中存在的诸多问题^[4]。基于条纹投影的三维测量方法具有非接触三维测量以及高精度、自动和快速处理数据等优点,在相关领域得到了人们的广泛研究和应用^[5]。基于条纹投影的三维测量方法先用设置好的投影仪投影一组或几组条纹图到待测物体上,然后通过相机拍摄投影到待测物体上的变形条纹图,并在计算机上通过一系列算法解析这些被调制的变形条纹图,最终恢复出待测物体的三维模型^[6-7]。

基于条纹投影的三维测量方法可分为时间相位展开方法和空间相位展开方法^[8]。空间相位展开方法是利用空间频率投影条纹图中相邻像素点进行相位展开并得到三维模型,对于表面复杂的物体,相位展开效率不高,无法保证三维模型的精度^[9]。时间相位展开方法通过拍摄多张投影条纹图确定全场相位并解析获取最终的三维模型,该过程中各像素点的相位展开在空间上相互独立,过程简单且获得的三维模型精度较高^[10-11]。为了减少时间相位展开方法中所需投影和采集的条纹图数目,提高三维测量结果的精度,基于空间波长选择的条纹投影时间相位展开技术在时间相位展开方法的基础上被提出。其中,基于空间波长选择的双波长条纹投影时间相位展开技术能使投影图像的总像素数为每个条纹所含像素数的整数倍,对应投影条纹的频率可以不为整数,即设计的条纹可以充分利用投影图像的所有像素。双波长条纹投影时间相位展开技术可以提高三维形貌测量方法的适用性,降低了算法对硬件设备的要求和采集的图像数目^[12]。Ding 等^[13]提出了一种可恢复具有不同空间频率的两个条纹图案绝对相位图的技术,但所选的投影仪分辨率没有突破条纹波长的限制,展开相位的容忍度还有待提高。Cao 等^[14]提出了用两个不同频率三角波投影的方法进行相位展开,可以达到与现有条纹投影轮廓(FPP)测量方法相同的精度。Mao 等^[15]提出了一种多频反相法,分析了周期性相位误差的理论模型,用一组条纹图案在包裹图中自适应地补偿周期性相位误差,无需对测量系统进行精确校准就能大大降低周期性相位误差。Guo 等^[16]提出了一种基于双频复合相移光栅的实时形状测量方法,但当被测物体的高频细节被平滑时,物体的边界相位容易出错,不能精确计算低频条纹的相位。Qian 等^[17]提出了一种基于深度学习的彩色 FPP 单次绝对三维形状测量方法,可直接从一张单色条纹图像中恢复出高分辨率、无运动伪影、无串扰的绝对相位图。但该方法需要训练大量的条纹图像数据,当图像本身不明确时,无法解决条纹图像固有的模糊性。

为了提高条纹投影三维形貌测量中使用投影仪的分辨率,本文提出了基于颜色分割的双波长条纹投影

相位展开修正算法。首先,在投影仪上增加了一张彩色条纹图进行投影,并对相机拍摄的变形彩色条纹图进行颜色分割。然后,分割得到不同的条纹区域,通过查找表方式对相位图进行相位展开,以获得绝对相位图。最后,结合三维标定参数进行计算,得到待测物体的三维模型,提高了可使用投影仪的分辨率,并通过实验验证了该修正算法的可行性。

2 双波长条纹的投影原理

用两组条纹空间波长(投影条纹每个周期所含的像素数目)分别为 λ_1 和 λ_2 的条纹图对待测物体进行投影,设投影图像上的像素点为 y_p 。用相机拍摄被物体表面调制的条纹图,采集到的条纹图上必定存在与投影图像上对应的像素点 y_c ,即投影的条纹图和采集的条纹图中相位相等的点具有一一对应关系^[12-13]。假设投影仪的分辨率为 R ,则投影图像的相位 $\Phi_{p_i}(y_p)$, $i=1,2$ 满足

$$\begin{cases} \Phi_{p_1}(y_p) = \Phi_{c_1}(y_c) \\ \Phi_{p_2}(y_p) = \Phi_{c_2}(y_c) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi_{p_1}(y_p) = 2\pi/\lambda_1 \\ \Phi_{p_2}(y_p) = 2\pi/\lambda_2 \end{cases}, y_p \in [0, +\infty)。 \quad (2)$$

用相机采集被物体表面调制的条纹后,通过 6 步相移测量轮廓术只能求解得到包裹的相位图 $\varphi_{c_1}(y_c)$ 和 $\varphi_{c_2}(y_c)$,其取值范围为 $[-\pi, \pi)$,这些相位图与其绝对相位 $\Phi_{c_1}(y_c)$ 和 $\Phi_{c_2}(y_c)$ 具有一定的数学关系,可表示为

$$\begin{cases} \Phi_{c_1}(y_c) = 2\pi m_1(y_c) + \varphi_{c_1}(y_c) \\ \Phi_{c_2}(y_c) = 2\pi m_2(y_c) + \varphi_{c_2}(y_c) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $m_1(y_c)$ 和 $m_2(y_c)$ 为条纹阶数(整数)。求解绝对相位,就要先求解出条纹阶数。为了使投影仪图像的相位关系匹配,需要进行补 0 对齐,不失一般性,用包裹相位图 $\varphi_{c_1}(y_c)$ 和 $\varphi_{c_2}(y_c)$ 的数值都加上 π ,使相位图的数值上移至 $[0, 2\pi)$,即

$$0 < \varphi_{c_1}(y_c), \varphi_{c_2}(y_c) < 2\pi。 \quad (4)$$

为了简化公式,省略下标 C。结合式(1)~式(3),得到

$$\frac{\lambda_1 \varphi_1(y) - \lambda_2 \varphi_2(y)}{2\pi} = m_2(y) \lambda_2 - m_1(y) \lambda_1。 \quad (5)$$

式(5)的等式左侧可以通过条纹分析技术得到,且等式右侧和左侧的值均为整数。如果式(5)的右侧数值与条纹阶数 $m_1(y)$ 和 $m_2(y)$ 存在一一对应关系,就能通过包裹相位图求出条纹阶数。联立式(4)和式(5),得到不等式

$$-\lambda_2 < m_2(y) \lambda_2 - m_1(y) \lambda_1 < \lambda_1, \quad (6)$$

联立式(1)、式(2)、式(4),得到

$$0 \leq m_2(y) < R/\lambda_1, \quad (7)$$

$$0 \leq m_2(y) < R/\lambda_2。 \quad (8)$$

联立式(6)~式(8),建立从 $[\lambda_1 \varphi_1(y) - \lambda_2 \varphi_2(y)] /$

(2π) 到 $m_1(y)$ 、 $m_2(y)$ 特殊映射关系的查找表。在查找表中, $[\lambda_1\varphi_1(y) - \lambda_2\varphi_2(y)] / (2\pi)$ 和 $m_1(y)$ 、 $m_2(y)$ 存在一一对应关系, 通过每个像素点的相位确定唯一对应的条纹阶数, 从而进行正确的相位展开操作。双波

长条纹投影的三维建模步骤如图 1 所示。可以发现, 相比基于频率选择的方法, 双波长条纹投影相位展开算法在条纹选择上更加灵活, 且设计的条纹图像在一些常规的投影仪中应用时无需进行裁剪操作^[18]。

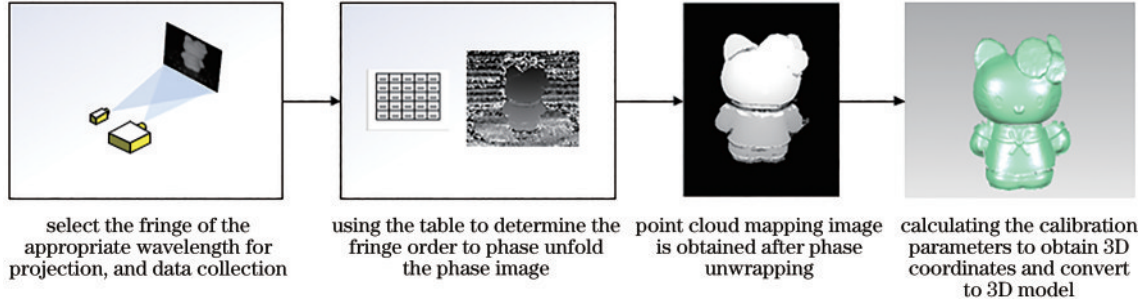


图 1 双波长条纹投影的三维建模步骤

Fig. 1 Three-dimensional modeling steps of dual-wavelength fringe projection

由式(7)、式(8)可知, 投影仪的分辨率与两组条纹的空间波长满足不等式

$$R \leq \lambda_1 \lambda_2 / k, \quad (9)$$

式中, k 为所选波长 λ_1 和 λ_2 的最大公约数。超出限定的分辨率范围后, 相位展开过程会产生错误, 生成不精确甚至错误的三维模型^[19]。一般情况下, 选择的投影仪分辨率小于两组条纹波长的乘积, 这不利于高分辨率投影仪的使用, 而本算法可以有效解决双波长条纹投影相位展开算法中投影仪分辨率受限的问题。

3 基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法原理

为了提高基于条纹投影相位展开算法的测量范围和精度, 使其能在任意给定投影仪分辨率下准确无误地进行相位展开, 提出了一种投影仪分辨率在 $R \leq \lambda_1 \lambda_2 / k$ 下能正确进行双波长条纹投影绝对相位恢复的算法, 具体实现步骤如下。

1) 选择合适的波长作为设计投影条纹的参数。

2) 选择合适的颜色区域范围作为设计彩色条纹的参数。将颜色区域范围 r 定义为

$$r = \lambda_1 \lambda_2, \quad (10)$$

将颜色块 n 定义为

$$n = [R/r], \quad (11)$$

式中, $[]$ 为向上取整。为了方便区分各个颜色块, 选择的颜色依次为红色(R)、绿色(G)、蓝色(B)。

3) 对彩色条纹图进行颜色分割。设定颜色分割阈值 δ , 选定彩色条纹图中的任意一颜色点 \mathbf{a} , 计算图像中任意一颜色点 \mathbf{z} 与颜色 \mathbf{a} 的欧氏距离, 可表示为

$$D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) = \|\mathbf{z} - \mathbf{a}\| = \left[(z_R - a_R)^2 + (z_G - a_G)^2 + (z_B - a_B)^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

式中, 下标 R、G、B 表示对应颜色点的 R、G、B 分量。大津阈值法即最大类间方差法(OTSU)对图像噪声具有很高的鲁棒性且计算过程简单、快速, 因此, 通过 OTSU^[20] 计算颜色分割阈值。方差 σ^2 与颜色分割阈值 δ 的数学关系可表示为

$$\sigma^2(\delta) = \frac{\left\{ \sum_{i=0}^{255} [255 \times X_{\text{hist}}(255)] \times \sum_{i=0}^{\delta} X_{\text{hist}}(i) - \sum_{i=0}^{\delta} [i \times X_{\text{hist}}(i)] \right\}^2}{\sum_{i=0}^{\delta} X_{\text{hist}}(i) \times \left[1 - \sum_{i=0}^{\delta} X_{\text{hist}}(i) \right]}, \quad (13)$$

式中: $\sum_{i=0}^{\delta} X_{\text{hist}}(i)$ 为输入彩色条纹图像的累加灰度直方图; $\sum_{i=0}^{\delta} [i \times X_{\text{hist}}(i)]$ 为该灰度直方图的一阶累加矩; $\sum_{i=0}^{255} [255 \times X_{\text{hist}}(255)]$ 为灰度图像的总灰度值。式(13)中方差取最大值对应的 δ 即为本算法需要的目标颜色分割阈值。若 $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq \delta$, 表明点 \mathbf{z} 与 \mathbf{a} 的颜色相近, 将两个点判断为同一颜色区域。计算图像中所有像素点的颜色与点 \mathbf{a} 的距离, 完成颜色分割。

4) 对颜色分割后的区域进行孔洞填充, 并去除边缘噪声区域。

5) 根据已知的颜色块数量 n 对彩色条纹图进行 n 次颜色分割。重复步骤 3), 删除已经分割的区域, 对剩余区域继续进行颜色分割。重新在对应区域选定新的点 \mathbf{a} , 计算未分割图像中任意一点 \mathbf{z} 与 \mathbf{a} 的颜色距离, 若 $D(\mathbf{z}, \mathbf{a}) \leq \delta$, 表明点 \mathbf{z} 与 \mathbf{a} 的颜色相近, 并将两个点判断为同一颜色区域。重复上述步骤 n 次后停止分割。

6) 建立查找表。表格中有三种不同的颜色, 对应不同的颜色区间, 即颜色条纹图中的颜色区间, 以根据

不同颜色区域对应的查找表对条纹进行相位展开。

7) 图像采集和分析。将具有两个波长的正弦条纹图像投影到待测物体上并用相机进行拍摄,通过条纹分析技术获取包裹相位图 $\varphi_1(y)$ 和 $\varphi_2(y)$ 。

8) 确定包裹相位图对应的颜色区域范围。选择对应的查找表范围,计算 $[\lambda_1\varphi_1(y) - \lambda_2\varphi_2(y)] / (2\pi)$ 即 $m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$ 的值并四舍五入取整,然后在查找表中寻找与该数值最接近的一行,记录下同行的 $m_1(y)$ 和 $m_2(y)$ 。

9) 三维模型的获取。根据式(2)和已经得到的 $m_1(y)$ 和 $m_2(y)$ 进行相位展开,恢复两个条纹的绝对相位,然后结合标定参数和绝对相位得出待测物体的三维坐标。

基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法通过建立不同区域并利用查找表进行相位展开。若增大投影仪的分辨率,所选波长又不满足 $R \leq \lambda_1\lambda_2/k$,建立的查

找表就无法将包裹相位图和条纹阶数一一对应起来,从而进行完整的三维模型重建。因此,本算法对条纹图进行分区域操作,将包裹相位图和条纹阶数之一一对应起来。通过投影仪投影一张彩色条纹图,并对这张彩色条纹图进行颜色分割,得到不同区域,然后进行分区域查表操作,确保每个颜色区域范围内利用查找表进行相位展开时得到的结果是正确的。

4 实验结果与分析

完成系统的标定后,对待测物体进行条纹投影并用相机拍摄条纹图,实验流程如图 2 所示。实验使用了波长分别为 $\lambda_1 = 13$ 和 $\lambda_2 = 23$ 的条纹进行投影,投影仪是分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ 的 DLPLCR4500 EVM,垂直分辨率 $R = 800$ 。根据式(10)计算的颜色范围 $r = \lambda_1\lambda_2 = 299$,已知 $\lambda_1 = 13$ 和 $\lambda_2 = 23$ 互质,解得 $k = 1$ 。因此,投影仪的分辨率不满足 $R \leq \lambda_1\lambda_2/k$,满足本次实验的条件。

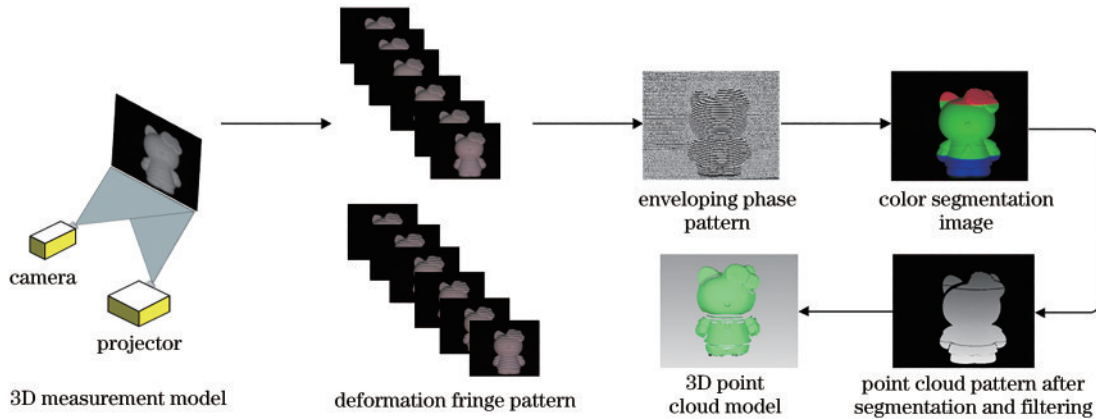


图 2 颜色分割实验的流程图

Fig. 2 Flow diagram of experiment of color segmentation

根据式(11)计算得到 $n = 3$,即将条纹图分为 3 个颜色块。图 3 和图 4 分别为设计好的彩色条纹图和对待测物体投影后得到的彩色条纹图。选定图像中包含颜色范围内的任意一个参考点 a ,计算整张图像中任意一点 z 与点 a 的颜色的距离,若 $D(z, a) \leq \delta$,表明点 z 与点 a 的颜色相近,将其判断为同一颜色区域,并将 δ 设置为颜色分割阈值。对整张图像的像素点进行判断



图 3 设计的彩色条纹图

Fig. 3 Color fringe image of the design

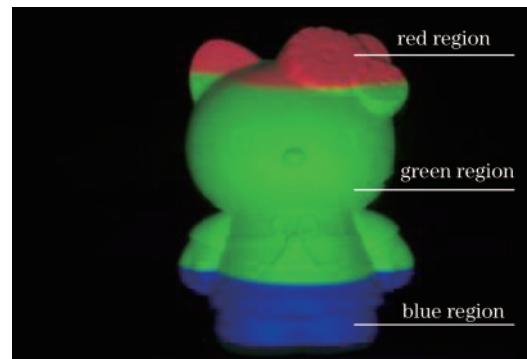


图 4 投影后采集的彩色条纹图

Fig. 4 Color fringe image collected after projection

后,可以得出哪些点在颜色上与参考点相似。如在图 5 中选择 a 作为其中一个颜色区域的参考点,建立的查找表如表 1 所示。根据双波长条纹投影原理可知,包裹相位图的像素点和彩色条纹图的像素点是一一对应的。因此,通过颜色分割对彩色条纹图进行区域划分,确定包裹相位对应的颜色区域,如图 6 所示。根据

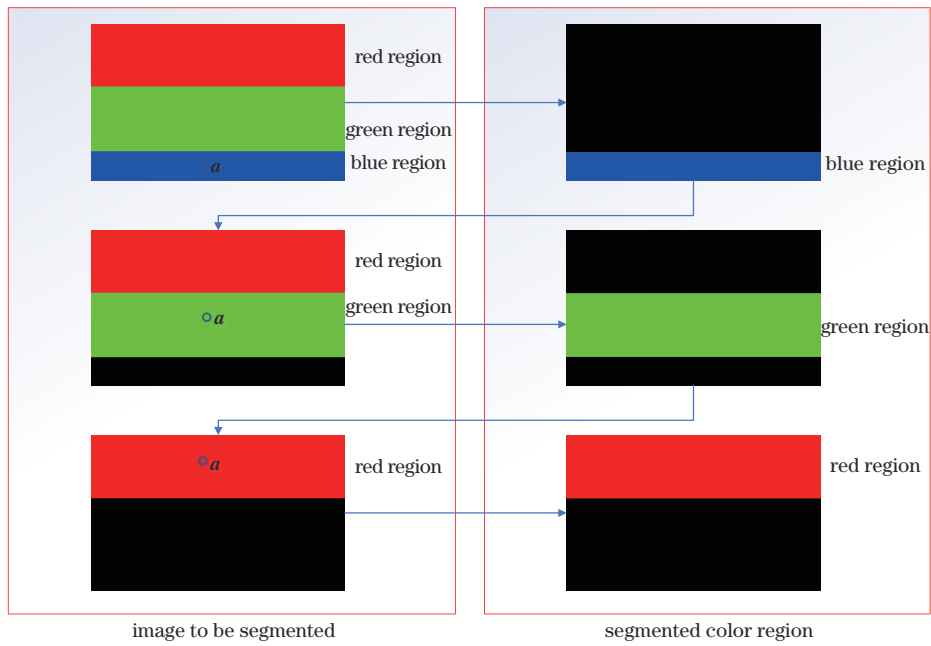


图 5 彩色条纹图的颜色分割步骤

Fig. 5 Color segmentation steps of color fringe image

表 1 当 $\lambda_1 = 13$ 和 $\lambda_2 = 23$ 时, $m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$ 到 $m_1(y)$ 和 $m_2(y)$ 的映射过程

Table 1 Mapping from $m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$ to $m_1(y)$ and $m_2(y)$ when $\lambda_1 = 13$ and $\lambda_2 = 23$

$m_1(y)$	$m_2(y)$	$m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$	$m_1(y)$	$m_2(y)$	$m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$	$m_1(y)$	$m_2(y)$	$m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$	$m_1(y)$	$m_2(y)$	$m_2(y)\lambda_2 - m_1(y)\lambda_1$
1	1	10	16	8	-21	31	16	-35	46	23	-69
2	1	-3	17	9	-14	32	16	-48	47	24	-59
3	2	7	18	9	-27	33	17	-38	48	24	-72
4	2	-6	19	10	-17	34	17	-51	49	25	-62
5	3	4	20	10	-30	35	18	-41	50	25	-75
6	3	-9	21	11	-20	36	18	-54	51	26	-65
7	4	1	22	11	-33	37	19	-44	52	26	-78
8	4	-12	23	12	-23	38	19	-57	53	27	-68
9	5	-2	24	12	-36	39	20	-47	54	27	-81
10	5	-15	25	13	-26	40	20	-60	55	28	-71
11	6	-5	26	13	-39	41	21	-50	56	28	-84
12	6	-18	27	14	-29	42	21	-63	57	29	-74
13	7	-8	28	14	-42	43	22	-53	58	29	-87
14	7	-21	29	15	-32	44	22	-66	59	30	-77
15	8	-11	30	15	-45	45	23	-56	60	30	-90

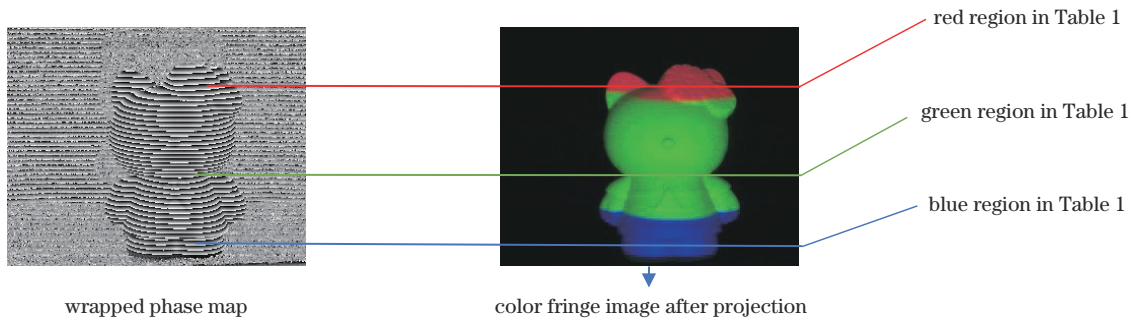


图 6 确定包裹相位图对应的颜色区域

Fig. 6 Determine the color area corresponding to the wrapped phase map

步骤 7)~步骤 9)进行相位展开,恢复出两个条纹的绝对相位,结合标定参数和绝对相位计算待测物体的三维坐标,最终得到的三维点云模型如图 7 所示。

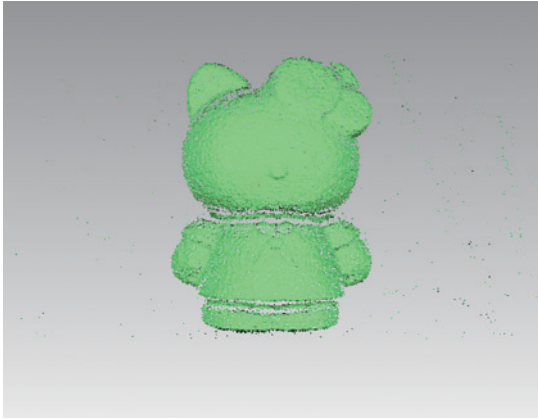


图 7 待测物体的三维模型

Fig. 7 Three-dimensional model of the object

实验结果表明,投影仪的垂直分辨率 $R \geq \lambda_1 \lambda_2$ 时,通过颜色分割的双波长条纹投影修正算法也能恢复出携带物体三维信息条纹的绝对相位,进而得到待测物体的三维模型,从而充分利用高分辨率的投影仪。

5 结 论

基于双波长条纹投影原理提出了一种基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法。实验结果表明,该算法能在任意给定的投影仪分辨率下准确无误地进行相位展开。通过对彩色变形条纹图像建立不同颜色区域的查找表进行相位展开,提高投影仪分辨率的使用范围和相位展开算法的精度。但受环境因素的影响,生成的三维模型仍然存在噪声,后续需要不断研究和改进三维滤波算法。基于颜色分割的双波长条纹投影修正算法可应用于更高分辨率的投影仪,对于未来在三维形貌测量中提高投影仪分辨率的研究具有重要的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
Zhang Z H, Liu W, Liu G D, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502.
- [2] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- [3] Watkins L R. Review of fringe pattern phase recovery using the 1-D and 2-D continuous wavelet transforms[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(8): 1015-1022.
- [4] 刘焱, 王焯. 位移传感器的技术发展现状与发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 76-80, 101.
Liu Y, Wang Y. Present status and trend of technical development of displacement sensor[J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(6): 76-80, 101.
- [5] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [6] 蔡泽伟. 数字条纹投影三维测量技术研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
Cai Z W. Research on 3D measurement technology of digital fringe projection[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [7] 朱昱. 数字条纹投影三维形貌测量技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
Zhu Y. 3D shape measurement based on digital fringe projection[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [8] Hu Y, Chen Q, Feng S J, et al. Microscopic fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106192.
- [9] Porrás-Aguilar R, Falaggis K. Absolute phase recovery in structured light illumination systems: sinusoidal vs. intensity discrete patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 84: 111-119.
- [10] Long J, Xi J, Zhang J, et al. Recovery of absolute phases for the fringe patterns of three selected wavelengths with improved anti-error capability[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(17): 1695-1705.
- [11] Ding Y, Xi J T, Yu Y G, et al. Absolute phase recovery of three fringe patterns with selected spatial frequencies [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 70: 18-25.
- [12] 龙佳乐, 张建民, 范智晖. 双波长条纹投影三维形貌测量的实现[J]. 光电子技术, 2015, 35(4): 258-262.
Long J L, Zhang J M, Fan Z H. Implementation of 3-D shape measurement with digital double-wavelength fringe projections[J]. Optoelectronic Technology, 2015, 35(4): 258-262.
- [13] Ding Y, Xi J, Yu Y, et al. Frequency selection in absolute phase maps recovery with two frequency projection fringes[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13238-13251.
- [14] Cao P, Xi J, Yu Y, et al. 3D shape measurement based on projection of triangular patterns of two selected frequencies [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29234-29248.
- [15] Mao C, Lu R, Liu Z. A multi-frequency inverse-phase error compensation method for projector nonlinear in 3D shape measurement[J]. Optics Communications, 2018, 419: 75-82.
- [16] Guo W, Wu Z, Li Y, et al. Real-time 3D shape measurement with dual-frequency composite grating and motion-induced error reduction[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26882-26897.
- [17] Qian J, Feng S, Li Y, et al. Single-shot absolute 3D shape measurement with deep-learning-based color fringe projection profilometry[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1842-1845.
- [18] Long J L, Xi J T, Zhu M, et al. Absolute phase map

- recovery of two fringe patterns with flexible selection of fringe wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(9): 1794-1801.
- [19] 龙佳乐. 多波长条纹投影三维测量中相位展开技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Long J L. Absolute phase map recovery with digital multiple wavelength fringe projections in three-dimensional measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [20] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1772-1781.
- Yuan X C, Wu L S, Chen H W. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1772-1781.