

基于窗口匹配的对称条纹投影测量方法

冷志博^{1,2}, 金鑫^{2*}

¹中国科学技术大学生命科学与医学部生物医学工程学院, 江苏 苏州 215000;

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215000

摘要 条纹投影三维测量技术因高精度、高鲁棒性、低成本等优点而被众多学者广泛研究和应用。然而,传统的方法大多需要投影多张条纹才能获取物体的三维形貌。因此提出一种快速条纹投影三维测量方法。设计一个对称相位用于相位解包,可以有效减少投影条纹的数量;将投影仪看作逆相机,把系统构建为一个立体视觉系统,利用立体视觉的极线约束对对称相位设计一种窗口匹配方式,增强相位解包的鲁棒性。相比传统的倍频法、多频外差法等,所提方法的条纹数量可以减少 50%,同时保证高的精度和鲁棒性。

关键词 三维测量; 条纹投影; 对称条纹; 窗口匹配; 精度和鲁棒性

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212862

Symmetrical Fringe Projection Measurement Method Based on Window Matching

Leng Zhibo^{1,2}, Jin Xin^{2*}

¹School of Biomedical Engineering, Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Suzhou 215000, Jiangsu, China;

²Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, Jiangsu, China

Abstract The fringe projection three-dimensional measurement technology has been extensively investigated and used by numerous scholars owing to its high precision, high robustness, low cost, and other benefits. However, most traditional approaches require projecting numerous fringes to generate the object's three-dimensional shape. This study provides a fast fringe projection three-dimensional measurement approach, designing a symmetrical phase for phase unwrapping, which can efficiently decrease the number of projected fringes. In this approach, the projector is regarded as an inverse camera, the system is built as a stereo vision system, and a window matching approach is developed to improve the robustness of phase unwrapping using the epipolar limitation of stereo vision for the symmetrical phase information. Compared with the traditional frequency doubling approach and multi-frequency heterodyne approach, the number of fringes of the proposed approach can be reduced by 50% while assuring high accuracy and robustness.

Key words three-dimensional measurement; fringe projection; symmetrical fringe; window matching; accuracy and robustness

1 引言

光学非接触三维测量一直以来在工业生产、质量控制、视觉导航、逆向工程、生物医学、虚拟现实等众多领域具有广泛应用^[1-2]。随着计算机和数字技术的发展,光学非接触三维测量也一直快速发展,包括双目视觉法^[3]、结构光法^[4]、时间飞行法^[5]等,其中基于条纹投

影的结构光技术因精度高、速度快和点云密集等优势成为研究热点之一^[6-9]。

条纹投影三维测量方法主要分为傅里叶变换轮廓术^[10]和相移变换轮廓术^[11]。由于傅里叶变换轮廓术难以对复杂和孤立的物体进行测量,因此相移轮廓术更常被采用。相移法通过投影 N 张相互相移的条纹到测量物体表面,然后通过最小二乘法求取包裹相位。包

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2021-11-16; 录用日期: 2021-11-22; 网络首发日期: 2021-12-03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDC07040000)

通信作者: *jinx@sibet.ac.cn

裹相位的取值范围通常为 $[0, 2\pi)$, 并且伴随着 2π 的间断。为了消除 2π 的包裹获取绝对相位, 研究者发展了许多相位展开算法, 包括格雷码法^[12]、多频外差法^[13]、倍频法^[14]等一系列流行的算法。

格雷码法通过将条纹阶次编码到格雷码图案中, 从采集的格雷码图像中求取条纹阶次^[15]。多频外差法与倍频法类似, 额外投影不同频率的条纹, 获取不同频率的包裹相位, 然后通过外差原理或者倍频原理求取条纹阶次, 再进一步获取绝对相位。为了获取稳定的条纹阶次, 多频外差法与倍频法通常采用多组不同频率的条纹, “三频外差”和“三频法”是常用的绝对相位计算方法, 这样求取最后的绝对相位时往往需要 $3N$ ($N \geq 3$) 张条纹投影。随着工业自动化的发展, 对三维测量速度有着越来越严格的要求。因此传统的测量方法渐渐地难以满足生产的需要。

为了提升三维测量速度同时保证精度不下降, 本文提出了一种基于窗口匹配的对称条纹投影测量方法, 该方法只需要投影 $N+2$ 幅条纹就可以完成三维点云重建。为了完成绝对相位的展开, 提出窗口匹配的思路来求取条纹阶次。所提方法首先将投影仪看作一个逆相机, 与另一个相机构成一个双目系统, 引进极线约束的思路将匹配从二维搜索降为一维搜索; 然后借助包裹相位的性质减少匹配数量; 最后设计了一组对称条纹并使用窗口匹配的思路确定唯一的匹配点, 最终求取条纹阶次。

2 相位解包裹

2.1 相移法

相移法通常向物体投射 N 张相移差为 $2\pi/N$ 的条纹, 本文以四步相移为例说明相移法的原理。四步相移的数学表达式为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos\left[\phi(x, y) + \frac{2n\pi}{4}\right], \quad (1)$$

$$n = 0, 1, 2, 3,$$

式中: (x, y) 为像素点坐标; n 为相移图的索引; $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 分别为背景强度和调制强度; $\phi(x, y)$ 为包裹相位。 $\phi(x, y)$ 可以通过最小二乘法求解得到:

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\sum_{n=0}^3 I_n(x, y) \sin(2n\pi/4)}{\sum_{n=0}^3 I_n(x, y) \cos(2n\pi/4)}\right]. \quad (2)$$

求解得到的包裹相位形式如图 1 的实线所示, 是

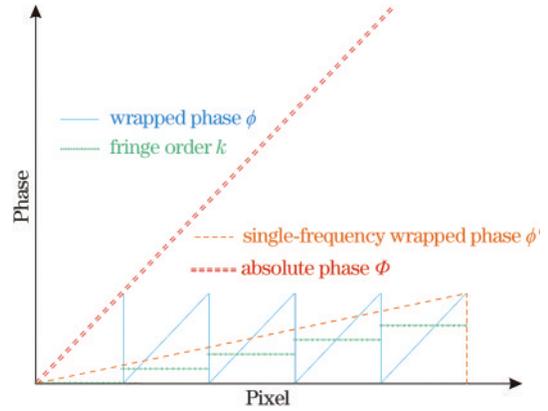


图 1 双频法

Fig. 1 Dual-frequency method

一个 0 到 2π 的周期性信号。因为周期性的包裹相位是一个多对一的映射函数, 无法直接获取绝对深度信息, 因此需要移除 2π 的周期性获取绝对相位。经过多年的研究, 学者们提出了众多相位展开算法, 例如格雷码方法、多频外差方法、倍频方法等。倍频法相对其他两种方法在速度和鲁棒性上略有优势^[16], 对所提方法与倍频法进行对比。

2.2 倍频法

倍频法通常采用几组频率相差整数倍的条纹求解条纹序号, 然后再利用条纹序列对包裹相位进行展开, 获取绝对相位。

2.2.1 双倍频法

假设包裹相位的频率为 f_1 , 双倍频法通过额外投射一组频率为 $f_1/N_f=1$ 的条纹, 然后通过式(2)求解出一组频率为 $f_1/N_f=1$ 的包裹相位 ϕ' , 其形式如图 1 所示。 ϕ 的频率为 ϕ' 的 N_f 倍, 然后利用两组包裹相位可以求解条纹序号 k , 具体的方式为

$$k(x, y) = \text{Round}\left[\frac{N_f \phi'(x, y) - \phi(x, y)}{2\pi}\right], \quad (3)$$

式中: $\text{Round}[\cdot]$ 为取整函数。得到的条纹阶次形式如图 1 中的密虚线所示。得到图 2 双虚线所示的绝对相位的表达式为

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi \cdot k(x, y). \quad (4)$$

在数字条纹投影三维测量中, 为了获取高精度的相位信息, 投影的条纹频率通常被设置得比较高。在双倍频法中, 频率差 N_f 往往会很大。受到环境噪声和电子硬件噪声影响等, 式(3)会转变为

$$k(x, y) = \text{Round}\left\{\frac{N_f[\phi'(x, y) + \delta_1(x, y)] - [\phi(x, y) + \delta_2(x, y)]}{2\pi}\right\}, \quad (5)$$

式中: $\delta_1(x, y)$ 和 $\delta_2(x, y)$ 为引入相位中的噪声。当 N_f 变大, 噪声 $N_f \delta_1(x, y)$ 同样会被放大, 当这个误差超越 π 时就会引起条纹阶次 k 的错误。因此双倍频法在高

精度测量中难以有鲁棒的绝对相位, 通常采用的方式是再增加一组条纹, 形成三倍频法, 将 N_f 分解为 N_{f1} 和 N_{f2} 两个频率。

2.2.2 三倍频法

三倍频法的原理如图 2 所示,三组频率不同的条纹分别通过最小二乘法获取不同频率的包裹相位,然后使用 ϕ 和 ϕ' 通过式(3)首先获取第一级条纹阶次 k_1 ,再通过 ϕ' 和 ϕ'' 获取第二级条纹阶次 k_2 。获取最后条纹阶次 k 的表达式为

$$k(x, y) = N_{\phi} \cdot k_2(x, y) + k_1(x, y), \quad (6)$$

然后和双倍频原理类似,通过式(4)获取解包裹后的绝对相位。三倍频法因高精度和高鲁棒性的优势被广泛地应用在工业测量领域,但是多张图的投影往往使得测量效率低下,以四步相移为例,完成一次三倍频的测量需要投影 12 张条纹图像。

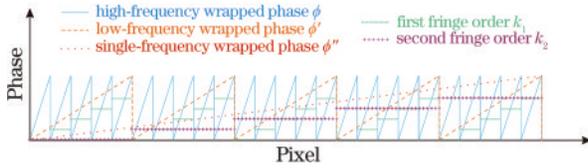


图 2 三频法

Fig. 2 Three-frequency method

3 基于窗口匹配的对称条纹投影

为了有效提升条纹的测量效率,本文设计了一种对称条纹的投影测量方式,通过 $N+2$ 张条纹投影(其中 N 代表相移条纹数量,2 代表两张对称条纹),条纹数量比传统三倍频法减少 50% 左右,同时测量精度保持不变。

3.1 对称条纹

设计一组对称条纹来完成对包裹相位的解包,获取绝对相位信息,对称条纹的编码方式为

$$\begin{cases} S(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \sin[\phi_1(x, y)] \\ C(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi_1(x, y)] \end{cases}, \quad (7)$$

式中: ϕ_1 为对称相位。 ϕ_1 的解算公式为

$$\phi_1(x, y) = \arctan \left[\frac{S(x, y) - a(x, y)}{C(x, y) - a(x, y)} \right]. \quad (8)$$

其中背景强度 $a(x, y)$ 可以通过之前的相移条纹获取,具体如下:

$$a(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^N I_i(x, y)}{4}. \quad (9)$$

获取的对称相位 ϕ_1 的形式如图 3 所示,变化范围从 0 到 2π ,然后再从 2π 到 0。相对于双频相位,单频相位有以下优点:对称相位的频率更高,这样与包裹相位的频率差会降低,从而降低噪声的影响;仅仅通过两张图就可以获取对称相位,效率更快;对称相位呈现对称形式,左侧相位斜率为正,右侧相位斜率为负,这样容易被区分。但是,相比三倍频方法,对称条纹方法的频率差还是相对较大,鲁棒性也会相对较低。为了进一步提升鲁棒性,继续设计了一个基于窗口配准的条纹

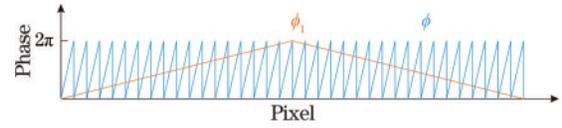


图 3 对称相位和包裹相位

Fig. 3 Symmetrical phase and wrapped phase

序列确定方法。

3.2 基于窗口匹配的条纹序列确定

通过式(7)可以获得一个全场双频的对称相位,为了进一步提升解包的鲁棒性,使用一个窗口匹配的方式,并借助极线辅助相位展开。将投影仪看作一个相机,与成像相机形成一个双目视觉结构。在双目视觉结构中,存在一个重要的对极几何关系,即一个视觉的一条极线对应另一个视觉的一条极线,或者说,对于一个视觉的某一点,在另一个视觉中存在一条极线与该点对应,它们来源于空间中的同一个位置。如图 4 所示,对于相机成像平面的某点 P ,其对应的匹配点位于投影仪平面的极线中。这样对于 P 点,全局匹配点搜索就可以从全局降维到极线上,然后可以借助包裹相位的值进一步将极线上的匹配点减少为离散点,如图 4 右侧的圆点和星点,它们与左侧的 P 点拥有相同的相位值。

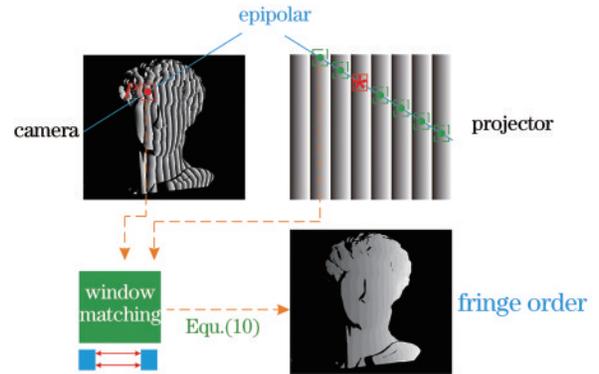


图 4 窗口匹配

Fig. 4 Window matching

为了确定 P 点在投影仪平面上的唯一匹配点,使用窗口匹配+对称相位的方式确定唯一的匹配点,并设计了一个匹配函数,公式为

$$D = \frac{\sum_{i=-E}^E \sum_{j=-F}^F [\phi_1(u_c + i, v_c + j) - \phi_p(u_p + i, v_p + j)]}{(2E+1) \cdot (2F+1)} + M \cdot D_1, \quad (10)$$

式中: ϕ_p 代表投影仪的对称相位。通过一个 $(2E+1) \times (2F+1)$ 的窗口求取对称相位相似度的平均值,可以有效地削弱噪声对相位匹配的影响。当匹配函数取得最小值时,可认为投影平面坐标 (u_p, v_p) 为 P 点的最佳匹配点。 M 为惩罚因子,当对称相位的两个不同斜率的区间匹配时惩罚因子就会发生作用,使得匹配函数 D 值变得很大。 D_1 为惩罚函数,具体的数学表达式为

$$D_1 = \left| \frac{\text{sign} \left\{ \sum_{i=-E}^{E-1} \sum_{j=-F}^F [\phi_1(u_c + i + 1, v_c + j) - \phi_1(u_c + i, v_c + j)] \right\}}{\text{sign} \left\{ \sum_{i=-E}^E \sum_{j=-F}^{F-1} [\phi_p(u_p + i + 1, v_p + j) - \phi_p(u_p + i, v_p + j)] \right\}} \right|, \quad (11)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。当对称相位的两个不同斜率区间匹配时, 符号会出现一正一负, 此时 $D_1=1$, $M \cdot D_1$ 会体现惩罚函数作用使得匹配函数 D 变大; 当对称函数的两个同向区间匹配时, 其符号同向, 此时 $D_1=0$, 惩罚函数不起作用。通过所设计的惩罚函数可以有效避免对称相位不同区间相同相位值的错误配准。通过窗口匹配函数, 可以有效地确定投影仪的最佳匹配点, 如图 4 所示的投影仪平面的星点。然后将该点的条纹序列值赋值到相机平面图像中, 就可以获得相机图像的条纹序列。接着通过式(4)就可以将包裹相位展开成绝对相位, 利用系统标定参数, 就可以生成三维点云数据^[17-19]。

4 实验

4.1 抗噪性实验

为了证明所提方法的抗噪性, 对双倍频法与所提方法在不同噪声环境下进行绝对相位精度测试, 测试的双倍频法和所提方法的最高条纹频率都为 49。通过使用 MATLAB 软件的 `awgn` 函数, 分别对不同方法的条纹添加三组不同的噪声, 信噪比 (SNR) 分别为 30, 25, 20, 测试结果如表 1 所示。使用均方根误差

表 1 RMSE 测试结果

Table 1 Test results of RMSE

SNR	RMSE /rad	
	Dual-frequency method	Proposed method
30	0.8954	0.0274
25	2.7424	0.0486
20	4.6445	0.0867

(RMSE) 对解包的绝对相位精度进行数值计算, 越严重的噪声让双倍频法的绝对相位严重失效, 而所提方法的绝对相位还维持在一个合理误差水平, 可以证明所提方法的高鲁棒性能。

4.2 实物测试

为了证明所提方法的精度和鲁棒性, 搭建了一个由投影仪 (DLP4500, TI) 和工业相机 (MV-CA020-10UM, 海康威视) 组成的条纹投影三维测量系统。投影仪的分辨率为 1140×912 , 相机的分辨率为 1240×1624 , 物体距离测量系统大约 300 mm。在实验中, 采用 8 张图投影的双频法和 12 张图投影的三频法与 6 张图投影的所提方法进行对比。最高频的条纹频率均为 36 频, 双倍频的两组频率分别为 36 和 1, 三倍频方法的三组频率分别为 36、6 和 1。为了方便计算精度, 由 8 步相移法获取的精准绝对相位作为对比。对一个复杂轮廓的雕像和一个纸盒进行测量, 采集的光栅如图 5 所示, 其中图 5(a)~(d) 为高频四步相移光栅, 图 5(e)~(f) 为对称条纹图, 图 5(g)~(j) 为低频四步相移图, 图 5(k)~(n) 为单频四步相移图。所提方法使用高频四步相移获取包裹相位图, 然后利用对称相位协助展开; 双倍频法利用图 5(k)~(n) 对包裹相位进行展开; 三倍频法多加一组低频相移图 5(g)~(j) 增强解包鲁棒性。

通过最小二乘法求取的高频包裹相位如图 6(a) 所示; 使用所提方法求取的对称相位如图 6(b) 所示; 根据极线约束和窗口配准的方式获得的条纹序列如图 6(c) 所示, 序列阶梯明显, 层次分明。双倍频、三倍频和所提方法得到的绝对相位分别为图 7(a)~(c) 所示。双倍频法对平面的纸盒基本上可以求出高精度的

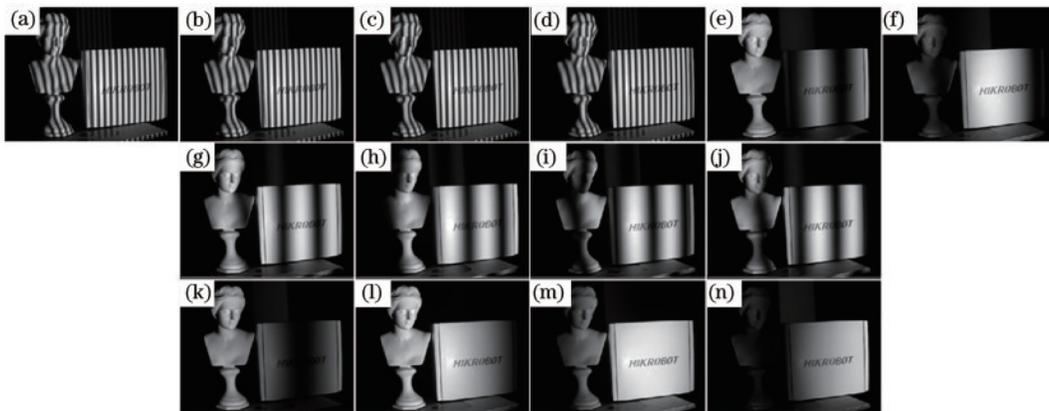


图 5 测量光栅图。(a)~(d) 高频四步相移图; (e)~(f) 对称条纹图; (g)~(j) 低频四步相移图; (k)~(n) 单频四步相移图

Fig. 5 Measurement grating diagrams. (a)~(d) High-frequency four-step phase shifting diagram; (e)~(f) symmetrical fringe diagram; (g)~(j) low-frequency four-step phase shifting diagram; (k)~(n) single-frequency four-step phase shifting diagram

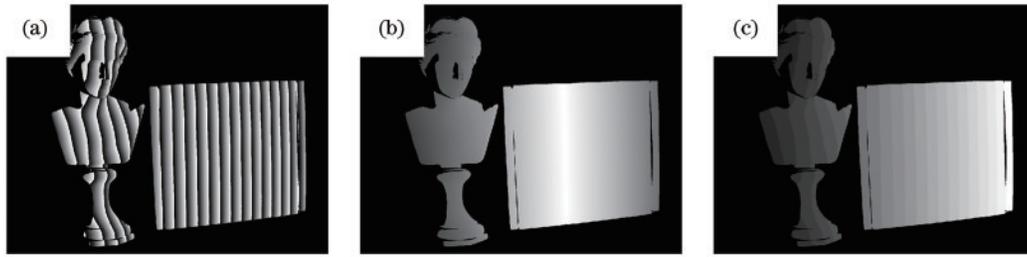


图 6 相位结果。(a)包裹相位;(b)对称相位;(c)条纹序列
Fig. 6 Phase results. (a) Wrapped phase; (b) symmetrical phase; (c) fringe order

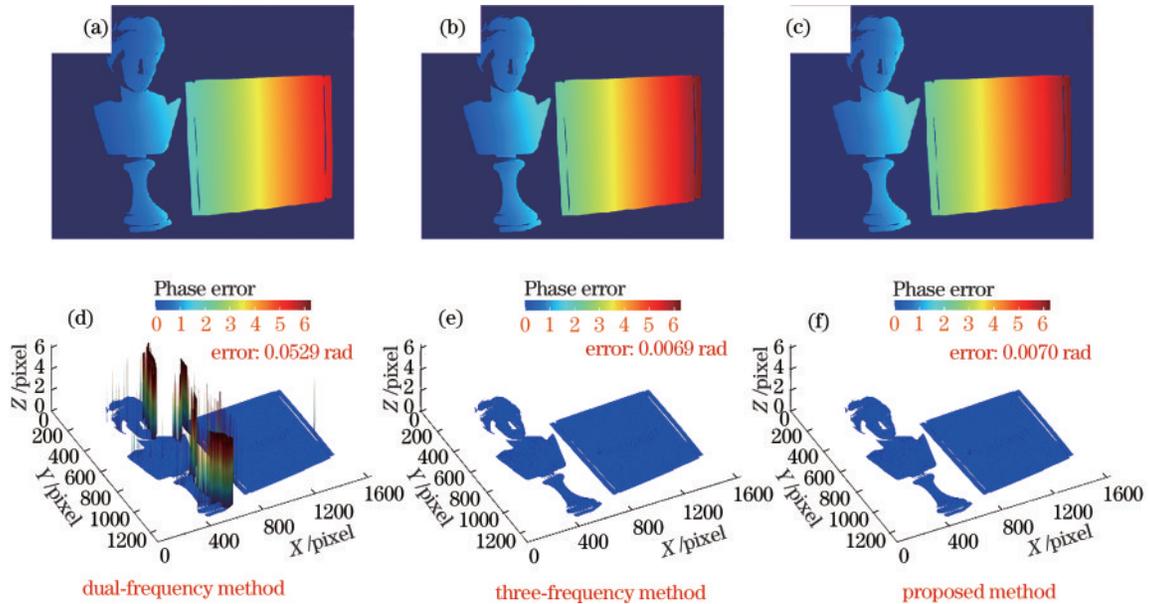


图 7 绝对相位和误差对比。(a)~(c) 绝对相位;(d)~(f) 相位误差
Fig. 7 Comparison of absolute phase and error. (a)~(c) Absolute phase; (d)~(f) phase error

绝对相位,但是在复杂纹理的雕像中则出现了一些团块的误差。三倍频方法和所提方法获得的绝对相位表面非常纯净。为了进一步对比误差,三种方法的误差图分别如图 7(d)~(f)所示。双倍频法处理的雕像表面出现了很多跳变误差,严重影响了绝对相位的精度,平均相位误差为 0.0529 rad;三倍频法和所提方法的相位误差分别为 0.0069 rad 和 0.0070 rad,优于双倍频

法 1 个量级左右。

最后通过标定好的系统参数,将不同方法获得的绝对相位转换为三维点云,如图 8 所示。可以看出:双倍频法在绝对相位出错的位置,三维形貌发生了错位;三倍频法和所提方法获取的三维形貌是正确的。对三维精度进行评估,具体的数值如表 2 所示,三倍频法和所提方法的精度接近,分别为 0.0075 mm 和



图 8 三维点云。(a)双倍频法;(b)三倍频法;(c)所提方法
Fig. 8 Three-dimensional point cloud. (a) Dual-frequency method; (b) three-frequency method; (c) proposed method

表 2 点云精度对比

Table 2 Point cloud accuracy comparison

Parameter	Dual-frequency method	Three-frequency method	Proposed method
Error /mm	0.0810	0.0075	0.0077

0.0077 mm。双倍频法由于部分重建错误,因此点云的平均误差更大,为0.0810 mm。

5 结 论

提出了一种基于窗口匹配的条纹投影测量方法。首先设计了对称相位,减小条纹频率差,提升信噪比,其次通过极线约束和窗口匹配的方式提升解包的鲁棒性。仅仅使用6张条纹投影,所提方法就可以实现和12张条纹投影的倍频法一样的精度,此外精度和鲁棒性要明显优于8张条纹投影的双倍频法,相位误差仅为其13%左右。实验中,稳定的绝对相位获取和三维点云的成功重建证明了所提方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 叶声华, 郝继贵, 王仲, 等. 视觉检测技术及应用[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 49-52, 62.
Ye S H, Zhu J G, Wang Z, et al. Visual inspection technology and its application[J]. Engineering Science, 1999, 1(1): 49-52, 62.
- [2] Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(9): B60-B77.
- [3] 隋婧, 金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. 电子技术应用, 2004, 30(10): 4-6, 12.
Sui J, Jin W Q. The realization and progress of binocular stereo vision technology[J]. Application of Electronic Technique, 2004, 30(10): 4-6, 12.
- [4] 黄燕钧, 李中伟, 史玉升, 等. 基于多频外差原理的三维测量技术[J]. 新技术新工艺, 2008(12): 1, 37-40.
Huang Y J, Li Z W, Shi Y S, et al. 3D measurement technology based on multifrequency heterodyne principle [J]. New Technology & New Process, 2008(12): 1, 37-40.
- [5] 潘华东, 王其聪, 谢斌, 等. 飞行时间法三维成像摄像机数据处理方法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(6): 1049-1056.
Pan H D, Wang Q C, Xie B, et al. Data processing method of time-of-flight 3D imaging camera[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(6): 1049-1056.
- [6] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 128-160.
- [7] 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.
- [8] Miao Z X, Zhang Q C. Dual-frequency fringe for improving measurement accuracy of three-dimensional shape measurement[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(10): 102601.
- [9] Yu X, Lai S S, Liu Y K, et al. Generic nonlinear error compensation algorithm for phase measuring profilometry [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(10): 101201.
- [10] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. Applied Optics, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [11] Yin Y K, Mao J Q, Meng X F, et al. A two-step phase-shifting algorithm dedicated to fringe projection profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137(10): 106372.
- [12] 于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍, 等. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2152-2157.
Yu X Y, Wu H B, Yin L P, et al. 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(12): 2152-2157.
- [13] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [14] Wang Z Y, Nguyen D A, Barnes J C. Some practical considerations in fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 218-225.
- [15] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- [16] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85(10): 84-103.
- [17] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.
- [18] Zhang Z H, Huang S J, Meng S S, et al. A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12218-12227.
- [19] Wang P, Wang J M, Xu J, et al. Calibration method for a large-scale structured light measurement system[J]. Applied Optics, 2017, 56(14): 3995-4002.