

改进的双向结构光编解码算法

孙伟伦¹, 徐文¹, 胡丹^{2*}, 刘凯^{1**}¹四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;²四川省产品质量监督检验检测院, 四川 成都 610100

摘要 双向相移结构光三维成像具有更高鲁棒性,但在两个方向上使用相同数量的多频相移编码,增加了扫描时间。利用极线几何,提出一种改进的双向结构光编解码算法,在保证精度的前提下能有效减少一个方向的编码图像的数量。首先,在纵向进行多频相移结构光扫描,得到纵向相位。利用极线几何,将纵向相位映射为横向临时相位。然后,在横向使用最高频结构光扫描,得到横向的高频缠绕相位。利用横向临时相位,对横向的缠绕相位进行解缠绕,得到最终的横向相位。最后,建立相机和投影机间的直线模型,在计算三维点云时,计算相机视线和投影机视线的交点,避免了传统的矩阵求逆方法,提高了点云计算速度。实验结果表明:1)最终横向相位的均方根误差为 4.89×10^{-3} rad;2)双向扫描和单向扫描后的三维点云计算速度分别提升了 6.08 倍和 4.10 倍;3)与传统的方法相比,所提针对单向扫描三维重建方法的误差在 10^{-11} mm 以内。

关键词 机器视觉; 双向扫描; 极限集合; 直线模型; 三维点云

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222710

Improved Coding and Decoding Algorithm for Structured Light Illumination Scanning Along Two-Direction

Sun Weilun¹, Xu Wen¹, Hu Dan^{2*}, Liu Kai^{1**}¹College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;²Sichuan Institute of Product Quality Supervision & Inspection, Chengdu 610100, Sichuan, China

Abstract Multi-frequency-phase-shift structured light illumination scanning along two-direction will achieve higher robustness, but it increases time spending on scanning and computing. This paper proposes an improved coding and decoding strategy for scanning along two-direction by means of epipolar geometry. First, after scanning along vertical direction and getting unwrapped vertical phase, the temporary horizontal phase is obtained according to unwrapped vertical phase and epipolar geometry of system. Then, after scanning along vertical direction and getting wrapped horizontal phase, unwrapped horizontal phase is obtained by using temporary unwrap algorithm. Finally, a line-model is established between the camera and projector. When calculating a 3D point cloud, the intersection point of the camera line of sight and the projector line of sight is calculated, avoiding the traditional matrix inversion method and improving the point cloud calculation speed. The experimental results show that: 1) the root mean square error of final lateral phase is 4.89×10^{-3} ; 2) the computation speeds of 3D point cloud after scanning along two-direction and scanning along one-direction are improved by 6.08 times and 4.10 times, respectively; 3) the proposed 3D point cloud reconstruction method for scanning along one-direction is within the error range of 10^{-11} mm compared with the traditional method.

Key words machine vision; scanning along two direction; epipolar geometry; line-model; 3D point cloud

1 引言

结构光三维测量是一种主动光学三维测量方式^[1],随着科技的进步,三维信息的获取与处理是三维

测量领域的重要研究问题。结构光三维测量技术因其非接触、精度高以及速度快的优点^[2]而广泛应用于很多领域,如自动化制造^[3]、生物工程^[4]等。一个结构光三维测量系统通常由投影机、相机以及计算机组成。

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2022-10-26; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2022YFG0233)、四川大学理科特色方向培育计划项目(2020SCUNL204)

通信作者: *demyd03@163.com; **kailiu@scu.edu.cn

投影机投影编码图案至被测物体,相机捕捉图案,计算机完成最终的三维重建。

通过保证投影机和相机的基线足够长^[5],传统的横向和纵向双向扫描在两个方向上使用相同数量的多频相移编码,扫描后获取了两个方向的相位信息,相比于获取单方向相位信息的单向扫描会多获得一维的信息,接着再使用最小二乘法^[6]求解点云可以获得更高的鲁棒性,但是该过程会增加扫描以及计算的时间。许多学者对其编码方案以及点云计算等方面进行改进以达到更好的准确性和实时性。在编码方案上,大部分学者选择使用融合编码方案,再在频率域里面进行相位的提取:Huang等^[7]使用窗口傅里叶变换(WFR)方法提取单帧融合编码图案的相位;Liu等^[8]通过投影多频相移的融合编码方案使用时间域解相位的方法提取相位;Liu等^[9]利用傅里叶变换提取4个方向的融合编码图案的相位;Xie等^[10]通过傅里叶测量轮廓术提取融合编码相位,再通过建立双向扫描物体表面梯度和相位变化的关系来进行三维重建。这些融合编码的方法虽然可以减少双向扫描所需图案的数量,但是信噪比低容易受到噪声的干扰在实际中难以使用。在点云计算方面:Liu等^[11-12]通过扩展极线几何关系,提出查找表的方法用于点云的实时计算,将点云计算速度大大提升且无损精度;Yang等^[13]提出一种射线模型,该模型可代替传统矩阵求逆方法进行点云计算,但是其较为复杂。

本文改进双向扫描编解码方案,建立投影机和相机的直线模型,利用空间中相机视线和投影机视线交于一点的关系进行三维重建。实验结果表明:1)编解码方案是有效性的;2)建立模型来计算点云的方法在保证一定精度的基础上速度更快;3)与传统方法相比,单向扫描后利用射线模型进行三维重建的误差在 10^{-11} mm以内。

2 所提算法

2.1 改进的双向扫描编解码算法

使用多频相移正弦结构光进行纵向扫描,使用最高频(f_h)正弦结构光进行横向扫描,该编码方案可以表示为

$$\begin{cases} I_n^p = \alpha^p \left[0.5 + 0.5 \cos \left(2\pi f_x \frac{x^p}{W^p} - \frac{2\pi n}{N} \right) \right] + \beta^p \\ I_n^p = \alpha^p \left[0.5 + 0.5 \cos \left(2\pi f_y \frac{y^p}{H^p} - \frac{2\pi n}{N} \right) \right] + \beta^p \end{cases}, \quad (1)$$

式中:在投影机坐标(x^p, y^p)下, I_n^p 和 I_n^p 表示该像素点的光强值; α^p 是控制图案范围的调制常数; β^p 为保证光强值非负的平衡常数,通常设置为0;投影图案的频率 $f_x = f_h, f_y = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_h\}$; n 和 N 为相移索引和总相移步数; W^p 和 H^p 分别表示投影机的横向和纵向分辨率。

在投影编码图案至被测物体后,相机捕捉到的图像可以建模为

$$\begin{cases} I_n^c = A^{x^c} + B^{x^c} \cos \left(\varphi^{x^c} - \frac{2\pi n}{N} \right) \\ I_n^c = A^{y^c} + B^{y^c} \cos \left(\varphi^{y^c} - \frac{2\pi n}{N} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:在相机坐标(x^c, y^c)下, A^{x^c} 和 A^{y^c} 表示平均光强; B^{x^c} 和 B^{y^c} 为亮度调制; φ^{x^c} 和 φ^{y^c} 表示相位,其可以表示为

$$\begin{cases} \varphi^{x^c} = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^{x^c} \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^{x^c} \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right)} \right] \\ \varphi^{y^c} = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^{y^c} \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^{y^c} \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right)} \right] \end{cases}, \quad (3)$$

式中: φ^{x^c} 和 φ^{y^c} 为缠绕相位。使用时间域解缠绕^[14]的方法得到纵向相位 Φ^{y^c} ,同时通过下述方法得到解缠绕的横向相位 Φ^{x^c} 。

使用相机和投影机的针孔模型。结构光三维成像包括投影机投影编码图案、相机捕捉图像以及计算机计算处理等3个过程。图1中,从投影机的光学中心 O_p 发射出的一条射线 $O_p P$ 经过物体反射后进入相机的视线 $O_c P$,再到达相机的光学中心 O_c 。相机的视线 $O_c P$ 投影在投影机平面会形成对应的极线 $E^p E_\infty^p$ 。

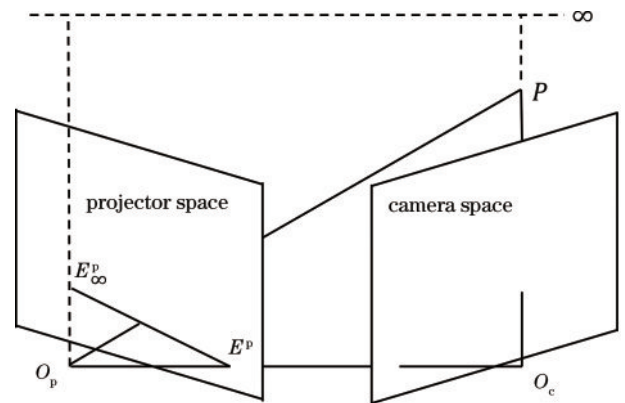


图1 结构光成像系统的极线几何关系^[15]

Fig. 1 Epipolar geometry of a structured light imaging system^[15]

在投影机平面内已经获得极线 $E^p E_\infty^p$ 的起始点 $E^p(x_e^p, y_e^p)$ ^[12]和终止点 $E_\infty^p(x_\infty^p, y_\infty^p)$ ^[12],根据平面内两点确定一条直线,极线方程可以表示为

$$\frac{x^p - x_e^p}{x_\infty^p - x_e^p} = \frac{y^p - y_e^p}{y_\infty^p - y_e^p}, \quad (4)$$

同时将解缠绕后的相位 Φ^{x^c} 和 Φ^{y^c} 映射到投影机空间:

$$(x^p, y^p) = \left(\frac{\Phi^{x^s} W^p}{2\pi}, \frac{\Phi^{y^s} H^p}{2\pi} \right). \quad (5)$$

横向的临时相位 T^{x^s} 可以通过解缠绕后的纵向相位 Φ^{y^s} 、式(4)和式(5)得到:

$$T^{x^s} = \frac{2\pi}{W^p} \left[\frac{\Phi^{y^s} H^p - y_e^p}{y_\infty^p - y_e^p} (x_\infty^p - x_e^p) + x_e^p \right], \quad (6)$$

在得到横向的临时相位 T^{x^s} 和缠绕相位 Φ^{x^s} 后, 横向相位 Φ^{x^s} 通过时间域解缠绕^[14]得到。

双向扫描解相位的过程如图 2 所示: 首先进行纵向多频结构光三维扫描, 经时间域解缠绕后得到解缠绕后的纵向相位; 再使用最高频结构光进行横向扫描得到缠绕的横向相位, 利用极线几何将解缠绕后的纵向相位映射为横向临时相位, 利用横向临时相位和缠绕的横向相位得到解缠绕后的横向相位; 最后使用解缠绕后的纵向相位和解缠绕后的横向相位进行三维重建。该过程与传统双向多频结构光三维扫描方法相比, 可以有效降低一个方向编码图案的数量, 即使用多频结构光三维扫描一个方向、使用最高频率结构光三维扫描另外一个方向。

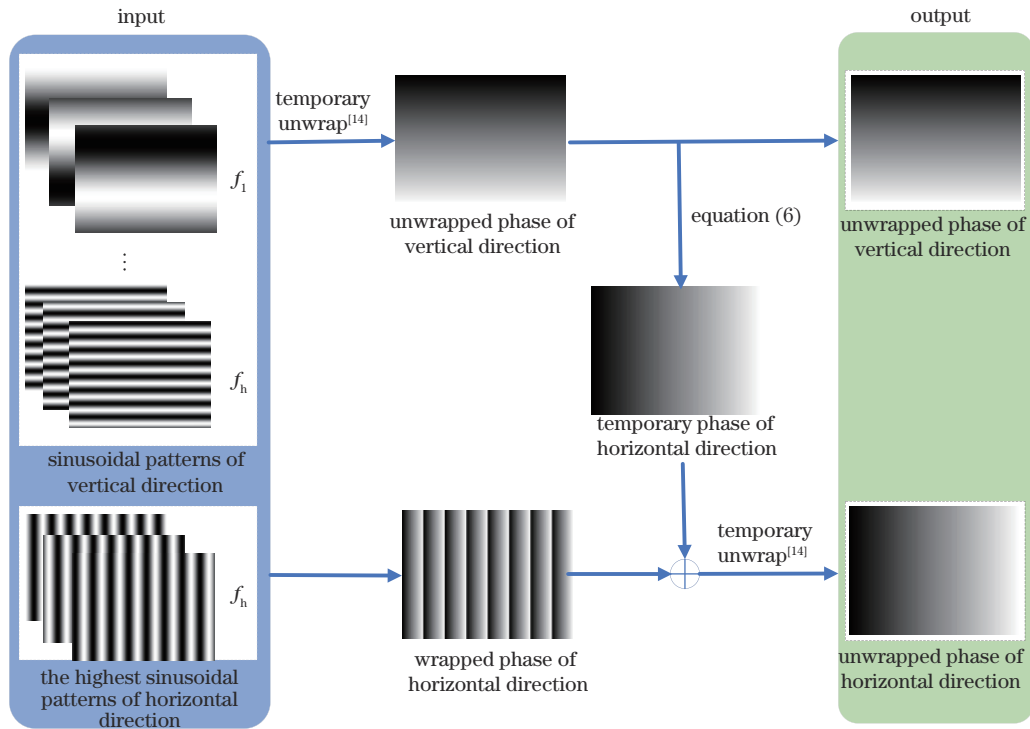


图 2 双向扫描解相位流程图

Fig. 2 Pipeline of phase unwrapping when scanning along two-direction

2.2 三维点云重建

三维重建本质上是三维空间中投影机视线和相机视线的相交。在结构光三维成像系统中, 相机的视线在投影机平面的投影会形成对应的极线, 那么三维重建过程可以简化为: 在投影机平面内, 投影机视线与投影机平面的交点在相机的视线形成的极线上。根据此关系对单向和双向结构光扫描后的三维重建分别进行优化。

双向扫描使用最小二乘法计算点云, 解决了因镜头畸变以及噪声干扰^[15]而导致相机视线和投影机视线无法相交于一点的问题, 提高了成像的鲁棒性。最小二乘法是在三维世界坐标系下沿着相机视线寻找最接近投影机像素的点的过程, 该过程可以近似为在投影机平面内寻找极线上距离扫描点 (x^p, y^p) 最近点, 如图 3(a) 所示, 即以扫描点 (x^p, y^p) 向对应的极线做垂线

相交于点 $E_v^p(x_v^p, y_v^p)$, E_v^p 即为最近点:

$$\begin{cases} x_v^p = \frac{k_2}{k_2 - k_1} x^p - \frac{1}{k_2 - k_1} y^p + \frac{y_e^p - x_e^p k_1}{k_2 - k_1} \\ y_v^p = -\frac{1}{k_2 - k_1} x^p - \frac{k_1}{k_2 - k_1} y^p + \frac{x_e^p + y_e^p k_2}{k_2 - k_1} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{y_\infty^p - y_e^p}{x_\infty^p - x_e^p} \\ k_2 = -\frac{1}{k_1} \end{cases}. \quad (8)$$

在得到点 E_v^p 后, $O_p P$ 的方向向量 (n_x^p, n_y^p, n_z^p) 可以通过文献[12]的式(5)计算得到。

单向扫描会在投影机平面获得相应的单方向坐标而另一方向坐标保持不变。以 Y 方向扫描为例, 如图 3(b) 所示, 投影机平面内的纵坐标 y^p 在扫描后已知, 而横坐标保持不变, 这会形成一条水平的直线。那

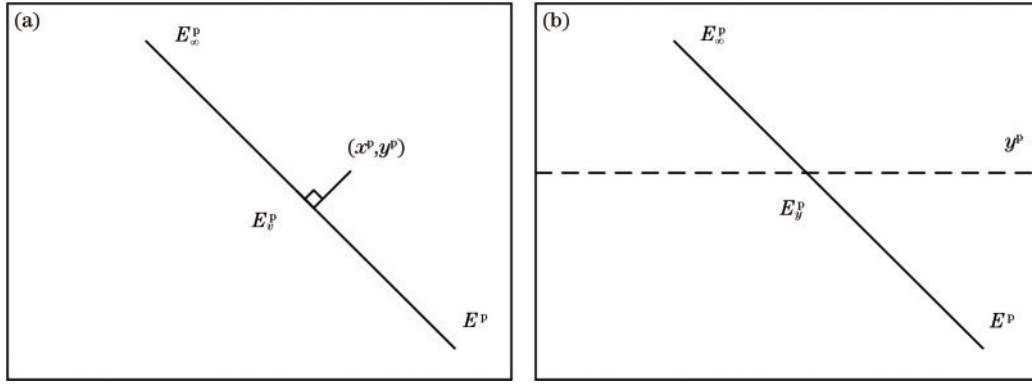


图3 寻找投影机平面内映射点的过程。(a)双向扫描最小二乘法的近似过程;(b)单向扫描

Fig. 3 Process of finding mapping points in the projector space. (a) Approximate process of least-square along two-direction; (b) scanning along one-direction

么投影机视线与投影机平面的交点即为该水平直线与其对应的极线的交点 $E_y^p(x_0^p, y^p)$ 。根据式(4), x_0^p 可以表达为

$$x_0^p = \frac{x_\infty^p - x_e^p}{y_\infty^p - y_e^p} y^p + x_e^p - \frac{x_\infty^p - x_e^p}{y_\infty^p - y_e^p} y_e^p. \quad (9)$$

在得到映射点 E_y^p 后, $O_p P$ 的方向向量 (n_x^p, n_y^p, n_z^p) 也可以通过上述方式求得。

在进行单向或双向扫描后,上述两种方式通过确定投影机视线与投影机平面交点的坐标获得了 $O_p P$ 的方向向量 (n_x^p, n_y^p, n_z^p) ,同理也可以在系统校准后利用相机的整数像素点提前得到 $O_c P$ 的方向向量 (n_x^c, n_y^c, n_z^c) 。那么 $O_p P$ 和 $O_c P$ 可以分别用投影机和相机的光学中心以及各自的方向向量表示:

$$\begin{cases} \frac{X^w - X_0^c}{n_x^c} = \frac{Y^w - Y_0^c}{n_y^c} = \frac{Z^w - Z_0^c}{n_z^c} = t_1 \\ \frac{X^w - X_0^p}{n_x^p} = \frac{Y^w - Y_0^p}{n_y^p} = \frac{Z^w - Z_0^p}{n_z^p} = t_2 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: (X_0^c, Y_0^c, Z_0^c) 为相机的光学中心; (X_0^p, Y_0^p, Z_0^p) 为投影机的光学中心; (X^w, Y^w, Z^w) 为物体的三维坐标; t_1 和 t_2 分别为两条直线的比例系数。

两条视线 $O_p P$ 和 $O_c P$ 会在三维空间中相交于点 P ,那么可以得到 t_1 和 t_2 :

$$\begin{cases} t_1 = \frac{(Y_0^p - Y_0^c)n_x^p - (X_0^c - X_0^p)n_y^p}{n_x^c n_y^p - n_y^c n_x^p} \\ t_2 = \frac{(Y_0^p - Y_0^c)n_x^c - (X_0^p - X_0^c)n_y^c}{n_x^p n_y^c - n_y^p n_x^c} \end{cases}. \quad (11)$$

在实际的使用过程中,系统只需要一次校准,校准后 t_2 的分子可以提前计算成查找表的形式,缩短了计算时间,那么最终的三维坐标可以通过用 t_2 来计算:

$$\begin{cases} X^w = t_2 n_x^p + X_0^p \\ Y^w = t_2 n_y^p + Y_0^p \\ Z^w = t_2 n_z^p + Z_0^p \end{cases}. \quad (12)$$

3 实验

实验系统包含1台分辨率为 800×600 的 Casio XJ-155V 投影机、1台分辨率为 640×480 的 Prosilica GC650C 相机和1台用于扫描控制和数据处理的台式计算机。通过提取计算机视频图形阵列端口的 VGA 信号使相机和投影机同步。所提算法通过 C++ 编程实现,程序运行在 CPU 配置为 3.10 GHz Intel i5-10500 的台式计算机上。两个方向相位真值均是由传统多频相移正弦结构光扫描获得的,其频率设置如下: $f_x = f_y = \{1, 4, 8, 16, 32, 64\}$ 且每个频率对应 8 张图案。

首先分别对标靶和石膏像进行双向扫描来验证解相位方法与传统方法的误差。式(1)的参数设置如下: $\alpha^p = 255, \beta^p = 0, N = 8, f_y = \{1, 8, 32\}, f_x = 32$ 。仅使用最高频率为 32 的正弦波来扫描 X 方向以达到缩减投影图案的目的,其和频率设置为 $f_x = f_y = \{1, 8, 32\}$ 的传统方法的唯一区别为横向的最终相位 Φ^x ,所以通过比较两种方式得到的 Φ^x 来验证此方法的可行性。 Φ^x 的误差如图 4 所示,误差更多在扫描物体的边缘以及反射率变化较大的地方,与真值相比较,所提方法和传统方法对石膏像的横向解相位的均方根误差分别为 4.89×10^{-3} rad 和 4.88×10^{-3} rad。经过滤波之后,总像素点个数为 256052,所提方法相序出错点个数为 538,传统方法相序出错点个数为 537。

为了排除相序出错等解相位原因的影响,使用两个方向扫描得到解缠绕后的相位真值进行三维重建来验证针对双向扫描后三维重建方法的实时性和准确性,结果如表 1 所示。可以看出,所提方法与传统最小二乘法[文献[12]中的式(6)]相比较,计算速度提升了 6.08 倍。但是在后面的不在系统测量范围内的白墙背景以及物体的边缘会有一些的误差,如图 5 所示。

为验证针对单向扫描提出的三维点云重建方法的

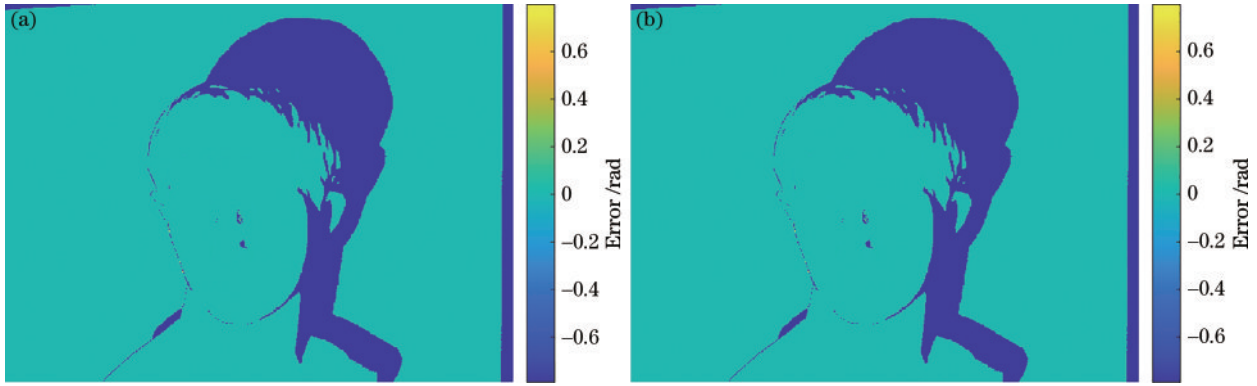


图 4 与真值相比较得到的 Φ^x 的误差。(a)所提方法;(b)传统方法

Fig. 4 Errors of Φ^x by comparing with the ground truth. (a) Proposed method; (b) traditional method

表 1 双向扫描点云重建耗时对比

Table 1 Comparing the speeds when scanning along two-direction

Method	Equation (6) in reference [12]	Proposed method
Time /s	0.079	0.013



图 5 与传统双向扫描点云重建方法的欧氏距离的误差

Fig. 5 Error of Euclidean distance from the traditional two-way scanning point cloud reconstruction method

实时性和准确性,使用上述扫描石膏像所得到的纵向真值相位进行单向扫描后的重建,结果如表 2 和图 6 所示。与传统的 3×3 矩阵求逆方法相比较,计算速度提升了 4.10 倍且可以做到与传统方法的误差在 10^{-11} mm 以内。

表 2 单向扫描点云重建耗时对比

Table 2 Comparing the speeds when scanning along one-direction

Method	Traditional method	Proposed method
Time /s	0.041	0.010

双向扫描和单向扫描后三维重建结果分别如图 7、图 8 所示。

最后对标准球体(已知半径为 86.50 mm)进行结构光三维测量来验证所提方法的准确性,结果如表 3 所示。



图 6 与传统单向扫描点云重建方法的欧氏距离的误差

Fig. 6 Error of Euclidean distance from traditional one-way scanning point cloud reconstruction method

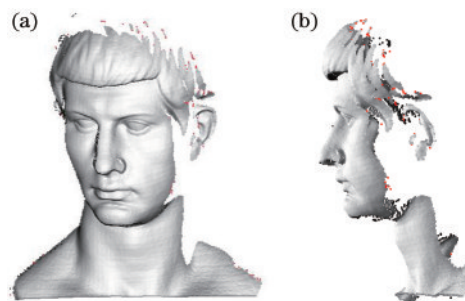


图 7 双向扫描后三维重建结果。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 7 3D reconstruction of statue when scanning along two-direction. (a) Front; (b) side

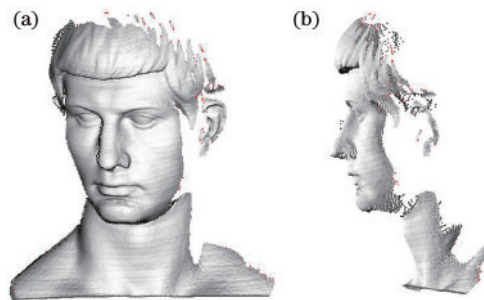


图 8 单向扫描后三维重建结果。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 8 3D reconstruction of statue when scanning along one-direction. (a) Front; (b) side

表 3 球体半径的误差

Table 3 Error in measuring the radius of a sphere

Method	One-direction		Two-direction	
	Equation (19) in reference [14]	Proposed method	Equation (6) in reference [12]	Proposed method
Error /mm	0.83	0.83	0.76	0.76

4 结 论

提出一种改进的双向结构光编解码算法,利用系统的极线几何关系针对双向扫描有效地减少了一个方向所需投影编码图案的数量,利用三维空间中相机和投影机视线的相交关系取代了传统双向扫描和单向扫描后的矩阵求逆的过程加快了三维重建的计算速度。实验结果证明了所提方法的有效性,同时针对单向扫描后的三维重建过程在误差为 10^{-11} mm 的基础上提升了计算速度。接下来,会将镜头畸变考虑在内优化极线方程进一步减少双向扫描算法的误差。

参 考 文 献

- [1] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
- [2] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [3] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303015.
Zhang Z H, Liu X H, Guo Z N, et al. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303015.
- [4] 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.
- [5] Zhang R H, Guo H W, Asundi A K. Geometric analysis of influence of fringe directions on phase sensitivities in fringe projection profilometry[J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7675-7687.
- [6] Liu K, Ran X N, Gong J, et al. Extending epipolar geometry for real-time structured light illumination II: lossless accuracy[J]. Optics Letters, 2021, 46(4): 837-840.
- [7] Huang L, Ng C S, Asundi A K. Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12809-12814.
- [8] Liu Y K, Olesch E, Yang Z, et al. Fast and accurate deflectometry with crossed fringes[J]. Advanced Optical Technologies, 2014, 3(4): 441-445.
- [9] Liu T C, Zhou C L, Liu Y P, et al. Deflectometry for phase retrieval using a composite fringe[J]. Optica Applicata, 2014, 44(3): 451-461.
- [10] Xie P, Tang M X, Wei X R. Three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal composite fringe reflection[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8200: 820014.
- [11] Liu K, Song J W, Lau D L, et al. Reconstructing 3D point clouds in real time with look-up tables for structured light scanning along both horizontal and vertical directions [J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6029-6032.
- [12] Liu K, Zhang K K, Wei J H, et al. Extending epipolar geometry for real-time structured light illumination[J]. Optics Letters, 2020, 45(12): 3280-3283.
- [13] Yang Y, Miao Y P, Cai Z W, et al. A novel projector ray-model for 3D measurement in fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 149: 106818.
- [14] Yalla V G, Hassebrook L G. Very high resolution 3D surface scanning using multi-frequency phase measuring profilometry[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5798: 44-53.
- [15] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.