

联合散斑与相位混合光场调制的三维重建方法

郭丽君¹, 张建伟^{1,2}, 郭燕琼¹, 李言章³, 任坤^{4*}

¹四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川 成都 610065;

²四川大学计算机学院, 四川 成都 610065;

³新疆海纳同创智能科技有限公司, 新疆 克拉玛依 834000;

⁴四川川大智胜软件股份有限公司, 四川 成都 610065

摘要 提出了一种联合散斑与相位混合光场调制的三维重建方法。首先, 基于双目立体视觉原理, 在被测物体表面投射 2 帧散斑和 3 帧相移条纹图案。然后, 用采集的散斑图像进行立体匹配, 得到粗视差图, 并通过调整条纹频率顺序解析出两组截断相位。最后, 通过两组相位辅助粗视差图进行精确匹配, 完成高精度的三维重建。实验结果表明, 相比传统方法, 本方法的重建速度更快、精度更高、鲁棒性更强。此外, 本方法不需要进行相位展开, 解决了匹配点出现在截断相位周期分界处附近时容易导致错误匹配的问题。

关键词 机器视觉; 散斑图; 截断相位; 线性插值; 立体匹配; 三维重建

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1015008

Three-Dimensional Reconstruction Method Based on Speckle and Phase Hybrid Light Field Modulation

Guo Lijun¹, Zhang Jianwei^{1,2}, Guo Yanqiong¹, Li Yanzhang³, Ren Kun^{4*}

¹National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

²College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

³Haina Tongchuang Intelligent Technology Co., Ltd., Karamay 834000, Xinjiang, China;

⁴Wisefsoft Co., Ltd., Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract This paper proposes a three-dimensional reconstruction method based on speckle and phase hybrid light field modulation. First, based on the principle of binocular stereo vision, 2 frames of speckle and 3 frames of phase-shifted fringe patterns are projected on the surface of the tested object. Then, the collected speckle images are used for stereo matching to obtain a coarse disparity map, and two sets of truncated phases are sequentially analyzed by adjusting the fringe frequency. Finally, two sets of phase-assisted coarse disparity maps are used for precise matching, resulting in the highest-precision three-dimensional reconstruction. The experimental results show that, compared with the traditional method, the reconstruction speed of the method is faster, the accuracy is higher, and the robustness is stronger. In addition, the method does not require phase unwrapping, which solves the problem that the matching point appears near the boundary of the truncated phase period, which may easily lead to incorrect matching.

Key words machine vision; speckle image; truncated phase; linear interpolation; stereo matching; three-dimensional reconstruction

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-07-14; 录用日期: 2021-08-13

基金项目: 2020 年四川省科技计划(2020YFG0306)、2020 年克拉玛依市科技计划(2020CGZH0040)

通信作者: *3787714@163.com

1 引言

随着光学技术和数字媒体图像设备的发展,利用二维(2D)图像进行三维(3D)重建的技术已应用于各行各业中。三维重建技术中,基于结构光的方法应用最广泛,其原理是向待测物表面投射不同频率的结构光图案,然后用标定后的相机采集带有结构光图案的人脸照片,利用双目立体匹配技术对人脸进行三维重建。

光投射在粗糙物体表面时,经过多个反射光的叠加形成随机分布的散斑图案,当散斑投射在待测人脸表面发生变形后,得到的人脸散斑图片具有一定的形变规律,从而解算出人脸的三维信息^[1]。微软公司首次应用红外激光散斑技术时,用已经标定位置的散斑图案和红外相机采集到的三维重构图像进行匹配,从而获取空间深度信息。潘创等^[2]提出了一种基于梯度方向的匹配代价计算方法,将全局匹配和导向滤波器串联起来进行代价聚合,实现了实时立体匹配。古家威等^[3]采用局部自适应二值化预处理散斑图像,用聚类算法提取散斑中心的像素坐标,再根据三角测距原理获取散斑深度值,提高了匹配成功率。谢宜江等^[4]对采集的待测人脸散斑图进行时空编码,然后采用时空积分图进行加速计算,最后利用深度学习检测算法多任务级联卷积神经网络(MTCNN)进行人脸检测和立体匹配,实现了快速高效的三维人脸建模。光栅投影相位测量技术具有形式灵活、分辨率高、鲁棒性好的优点,在三维重建中也有着广泛应用。其原理是用投影仪将多帧相移条纹图投射到待测物体或人脸表面,用相机获取变形条纹图后再进行相位处理,解算出三维形貌信息^[5-6]。但在实际测量过程中,投射的光栅条纹图会产生畸变,使获取的待测物图片包含大量的噪声干扰。针对该问题,马晓航等^[7]提出了一种基于改进三步相移的三维面形测量方法,对投影的光栅条纹图进行预校正,并引入了非定步相移,提升了三维测量精度。

上述方法单纯利用散斑或相移光栅条纹完成三维重建,但仅投射了一种结构光,无法利用图像完整的三维信息。戴鲜强等^[8]提出了一种基于相位信息辅助的散斑匹配三维测量方法,将散斑和相移光栅条纹结合起来,由粗到精获得了高质量的三维测量结果,但在处理相位突变点时算法的实现比较复杂。因此,本文结合散斑和正弦条纹的优点,提

出了一种联合散斑和相位混合光场调制的三维重建方法。首先,利用双目立体视觉系统原理,获取2对待测人脸散斑图案、3对正弦条纹相移图像,并对采集到的图像分别进行极线校正,使其对应匹配点处于同一水平线上。然后,对经过极线校正的散斑图像对进行立体匹配,计算得到粗视差图。最后,调整经过极线校正的相移条纹图像顺序,获得两组截断相位信息;基于两组截断相位信息,对截断相位突变点进行处理,对粗视差图进行精确匹配,得到精视差图,进而完成三维重建。该方法通过求解多套条纹截断的相位信息避免了传统三维重建方法中相位测量轮廓术所需的相位展开或解包裹过程,且不需要投射多帧条纹图,提升了立体匹配的效率,重建精度也有所提升。

2 基本原理

根据采集设备是否主动发射测量信号,可将三维重建方法分为基于主动视觉和基于被动视觉理论的方法。其中,被动视觉不需要结构光照射作为辅助,用相机采集三维场景得到二维图像,再根据图像纹理信息恢复深度信息,实现三维重建;主动视觉三维重建采用特定的照明光源,主要有傅里叶变换轮廓术、相移测量轮廓术、二值编码条纹、激光扫描法、散斑和相移条纹等。相移条纹结构光技术通过投影多个相移正弦条纹图,利用连续分布的相位信息对目标表面进行编码,以实现全空间分辨率的精确三维重建。但用相移测量技术或傅里叶分析方法解算相位时,获取的相位是不连续的,被截断在 $[-\pi, \pi]$ 的主值相位场中。为了获得完整的相位信息,需要利用相位解包裹算法,对截断相位进行展开。

目前基于空间和时间相位解包裹算法存在的缺点:1)只能得到相对相位;2)相位解包裹误差会导致欠采样,且会传播噪声等误差;3)只能计算连续相位分布区域(孤立物体);4)采集的投影帧数较多,重建时间较长。为了解决这些问题,人们提出了用二值编码即数字散斑代替条纹结构光进行三维重建的方法^[9-10]。散斑结构光技术通常将高对比度、独特强度的散斑纹理投射到被测物体表面,但该技术受投影分辨率的限制,很难获得高空间分辨率的图像。因此,提出了一种联合散斑和相位混合光场的无相位展开三维重建方法,系统平台如图1所示。将一台计算机产生的散斑和相移条纹图案输入投影仪中,由投影仪将图案投射到待测物体表

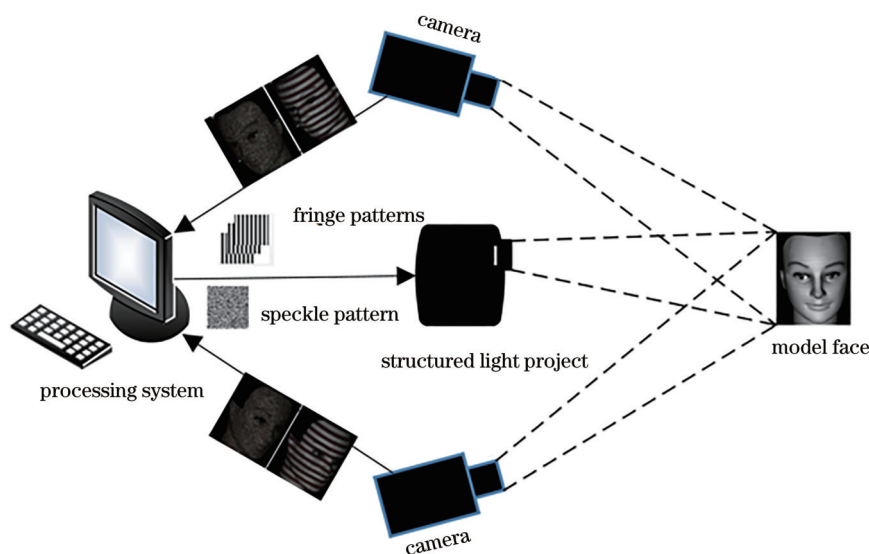


图 1 基于散斑条纹结构光的立体匹配三维重建平台

Fig. 1 Three-dimensional reconstruction platform based on speckle stripe structured light stereo matching

面,左右两个相机将采集的待测物图像反馈到计算机进行立体匹配。具体算法流程如图 2 所示。

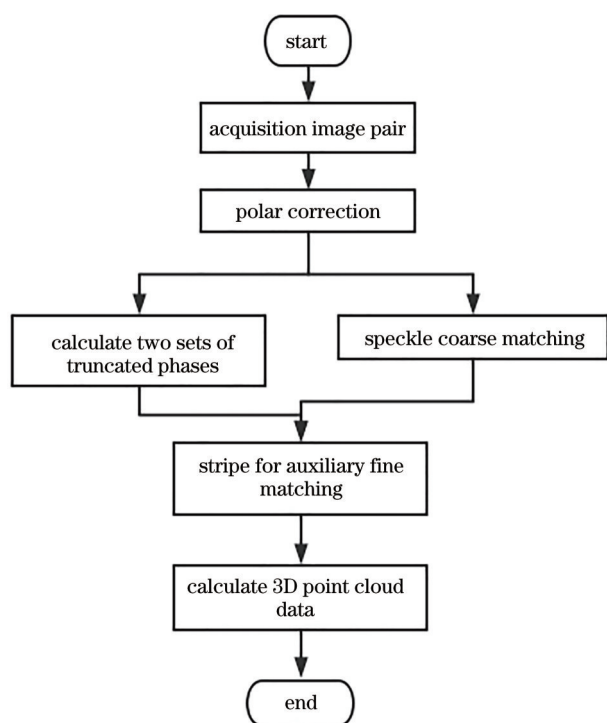


图 2 三维重建算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of three-dimensional reconstruction algorithm

2.1 散斑的初始立体匹配

数字散斑图案具有良好的随机性以及多样的纹理特征,用于双目视觉平台的三维重建时,可提高重建精度,如图 3 所示。基于散斑的立体匹配是在左右相机采集到的图像对上

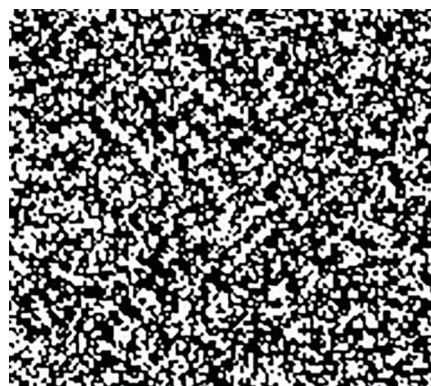


图 3 数字散斑图案

Fig. 3 Digital speckle pattern

图像上某个像素点在右图像上对应的点。为了提高匹配精度,减少散斑变形和噪声导致的误匹配率,传统匹配算法通常会利用一些约束条件,如极线约束、唯一性约束、顺序约束、连续性约束、光度相容性约束^[11]。

本方法选择极线约束辅助下的绝对差之和(SAD)灰度差累积^[12]计算匹配代价。双目立体视觉中的极线几何如图 4 所示。用左右相机的光心连线 $O_l O_r$ 作为基线,用点 P 和 $O_l O_r$ 构成的平面作为极平面,用基线与平面 P_l, P_r 的交点 e_l, e_r 作为极点。根据极线约束可知,左右相机采集图像的匹配点对在同一条极线上,从而将二维匹配计算降低到一维,减少了对应点的匹配查找区域,提高了匹配效率。

在极线约束处理后,利用两个 CCD 相机采集到的散斑图像对进行匹配,其原理如图 5 所示。在

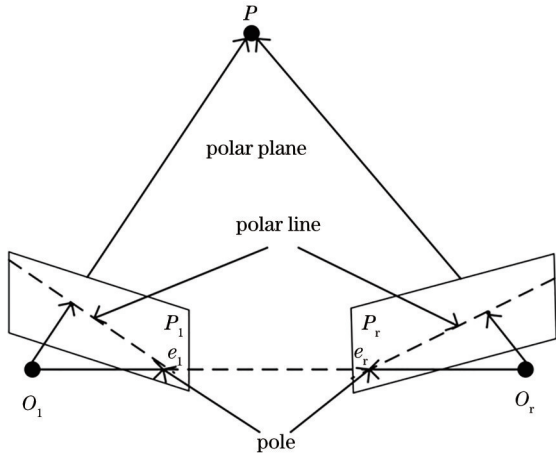


图 4 双目立体视觉中的极线几何

Fig. 4 Epipolar geometry in binocular stereo vision

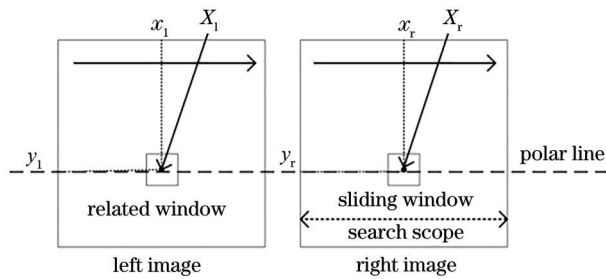


图 5 基于区域的立体匹配原理

Fig. 5 Principle of region-based stereo matching

x - y 坐标系下,左图像中有一待匹配点 $X_l(x_l, y_l)$,在右图像的搜索范围中寻找对应点 $X_r(x_r, y_r)$,并进行 SAD 匹配代价计算。由左图像中待匹配点 $X_l(x_l, y_l)$ 及其邻域内其他点组成一定大小的相关窗口,用相同尺寸的滑动窗口覆盖右图像中极线所在的搜索范围,将窗口内像素的灰度值对应相减,再进行绝对值求和。SAD 利用绝对误差、计算匹配点及其邻域内像素的灰度值和待匹配点区域对应的灰度差,有效保留了图像的领域像素信息,避免了归一化灰度互相关算法计算量大以及冗余的缺点。左右像素的匹配代价可表示为

$$C_{SAD} = \sum_{i < m}^m \sum_{j < n}^n |I_l(x_l + i, y_l + j) - I_r(x_r + l + i, y_r + j)|, \quad (1)$$

式中, I_l 和 I_r 分别为左右图像中匹配点的灰度值, C_{SAD} 为 X_l 和 X_r 的相似程度,邻域内灰度信息最相似的点 C_{SAD} 值最小,为最佳匹配点, m 、 n 分别为匹配图像的宽度和高度, l 为滑动窗口的大小。先对左右散斑图像进行一次初匹配,依据匹配结果可进一步

实现条纹的精匹配。

2.2 基于正弦光栅条纹的精确匹配

2.2.1 相移法

为了获得较高精度的匹配点,还需借助相移条纹图案对粗配准的结果进行精匹配。相移法是用投影仪将多帧正弦条纹图像投射到待测物体表面,然后对相机采集到的变形条纹图进行计算,得到绝对相位值。标准的正弦光栅条纹如图 6 所示,将计算机生成的标准正弦光栅条纹经投影仪投射到待测物,相机捕获到变形条纹的物体图像光强分布^[13]可表示为

$$I_i(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [2\pi f x + \phi(x, y)], \quad (2)$$

式中, $A(x, y)$ 为测量环境图像的背景光强, $B(x, y)$ 为图像中正弦光栅条纹的调制深度, f 为条纹的频率。 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 均为未知量,因此,至少需要投射 3 帧不同的正弦条纹图案进行求解。 $\phi(x, y)$ 为投射的结构光场中蕴含的相位信息,可表示为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{w=1}^N I_w(x, y) \sin(2\pi w/N)}{\sum_{w=1}^N I_w(x, y) \cos(2\pi w/N)}, \quad (3)$$

式中, N 为相移法的步数, w 为每次相移的频率系数。

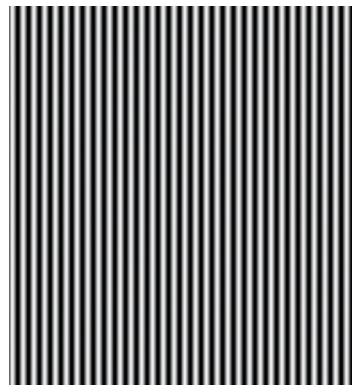


图 6 标准正弦光栅条纹图

Fig. 6 Standard sinusoidal grating fringe pattern

对于 $N(N \geq 3)$ 步相移法,投射的正弦光栅条纹图案为 N 帧。在相移法计算中已经去除了背景光强和正弦条纹调制幅值,且条纹投影对待测物体表面的点进行特征编码,极线上的相位值具有唯一性,从而克服了噪声和环境背景的干扰,适用于高精度三维重建^[14]。本方法选用 3 步相移法,每次相移 $2\pi/3$, 3 帧正弦光栅条纹受被测物体表面高度调

制产生的光强可表示为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) - 2\pi/3], \quad (4)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)], \quad (5)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi/3], \quad (6)$$

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3}\right]. \quad (7)$$

2.2.2 连续单调区间线性插值亚像素精匹配

在散斑粗匹配过程中,通过 SAD 窗口匹配方法得到左图像中匹配点 X_l 在右图像上最相似的初步匹配像素点 X_r ,如图 7 所示。在传统三维重建方法中,仅通过散斑匹配计算的左右图像对应像素点坐标计算视差并生成三维点云,重建效果比较粗糙,且存在空洞、波纹等缺点^[9]。为了提高散斑重建精度,在粗匹配基础上,本方法结合正弦条纹结构光技术进行相位辅助线性插值亚像素精匹配^[15]。

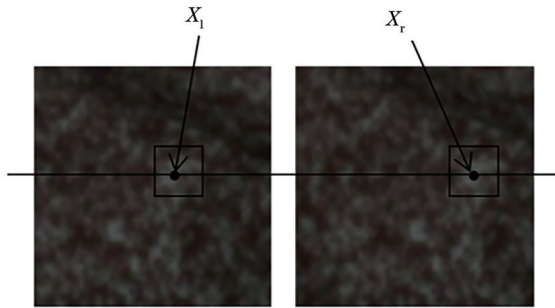


图 7 基于散斑的粗匹配

Fig. 7 Rough matching based on speckle

基于截断相位信息完成粗视差图到精视差图的匹配过程中,通常只使用一组截断相位。假设粗视差图中某像素点 X 的视差值为 d , ϕ_{x_l} 为左相位中匹配像素点 X_l 的相位值, ϕ_{x_r} 为右相位中匹配像素点 X_r 的相位值,根据视差计算公式,有 $X_r = X_l - d$ 。由于截断相位中每个单周期 $[-\pi, \pi]$ 内的相位信息都是单调递增的,当右图像极线上匹配点 X_{r1} 的相位值比左图像极线上待匹配点 X_l 的相位值小,即 $\phi_{x_l} > \phi_{x_{r1}}$,则右图像中的精确匹配点在 X_{r1} 右侧,如图 8(a)所示。搜索其右侧区域,找到第一个相位值比 X_l 大的辅助匹配点 X_{r2} ,采用单线性插值法计算出 X_l 在右图像中亚像素匹配点 X_r 的坐标,可表示为

$$X_r = X_{r1} + \frac{\phi_{x_l} - \phi_{x_{r1}}}{\phi_{x_{r2}} - \phi_{x_{r1}}}(X_{r2} - X_{r1}). \quad (8)$$

如果匹配点 X_{r1} 的相位值比左图像待匹配点 X_l 的

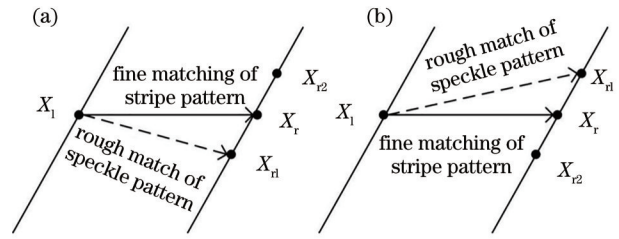


图 8 基于相位线性插值的亚像素匹配。(a)匹配点在 X_{r1} 右侧;
(b)匹配点在 X_{r1} 左侧

Fig. 8 Sub-pixel matching based on phase linear interpolation.

(a) Matching point on the right side of X_{r1} ;

(b) matching point on the left side of X_{r1}

相位值大,即 $\phi_{x_l} < \phi_{x_{r1}}$,则右图像中的精确匹配点在 X_{r1} 左侧,如图 8(b)所示。搜索左侧区域,找到第一个相位值比 X_l 小的辅助匹配点 X_{r2} ,通过线性插值法得到 X_l 在右图像中亚像素匹配点 X_r 的坐标,可表示为

$$X_r = X_{r2} + \frac{\phi_{x_l} - \phi_{x_{r1}}}{\phi_{x_{r1}} - \phi_{x_{r2}}}(X_{r1} - X_{r2}). \quad (9)$$

最后,根据左右匹配点的坐标求得精确视差值。

2.2.3 截断相位分界处点的相位匹配

由式(3)可知,利用相移法计算相位值时,通过反正切函数得到的相位不连续,被截断在 $[-\pi, \pi]$ 的周期内。为了获得完整的相位信息,需要借助相位解包裹算法,对截断相位进行展开处理。但传统基于空间和时间的相位解包裹算法只能得到相对相位,且存在欠采样、噪声等传播误差,计算速度较慢,影响重建速率及精度。此外,传统方法在截断相位连续区域内采用线性插值亚像素精匹配方法,在截断相位周期分界附近的匹配点无法直接比较左右相位信息并求解辅助匹配点,需要对其进行特殊处理,判断过程比较复杂,进一步增加了算法的难度。因此,提出了一种截断相位突变点的处理方法,具体步骤如下。

1) 对待测物投射正弦条纹图案,获取左右各 3 帧变形条纹 I_1 、 I_2 和 I_3 。

2) 以 I_1 、 I_2 和 I_3 为顺序,基于相移法计算第一组左右截断相位信息 φ_{l1} 和 φ_{r1} ,可表示为

$$\phi(x, y) = \arctan\left\{\frac{\sqrt{3}[I_1(x, y) - I_3(x, y)]}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right\}. \quad (10)$$

3) 变换条纹顺序,以 I_2 、 I_3 和 I_1 为顺序,同样用相移法计算获取第二组截断相位信息 φ_{l2} 和 φ_{r2} ,可表示为

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} [I_2(x, y) - I_1(x, y)]}{2I_3(x, y) - I_2(x, y) - I_1(x, y)} \right\} \quad (11)$$

左右相机待测人脸的变形光栅条纹如图 9 所示, 根据条纹图求解出的两组截断相位如图 10 所

示。其中, 第二组截断相位是通过改变相移条纹顺序获取, 从而使第一组截断相位分界处的匹配点在第二组截断相位图中正好匹配在相位的一个连续周期内, 且单调递增, 从而得到匹配点左右邻域内完整的相位信息。具体匹配过程如下。

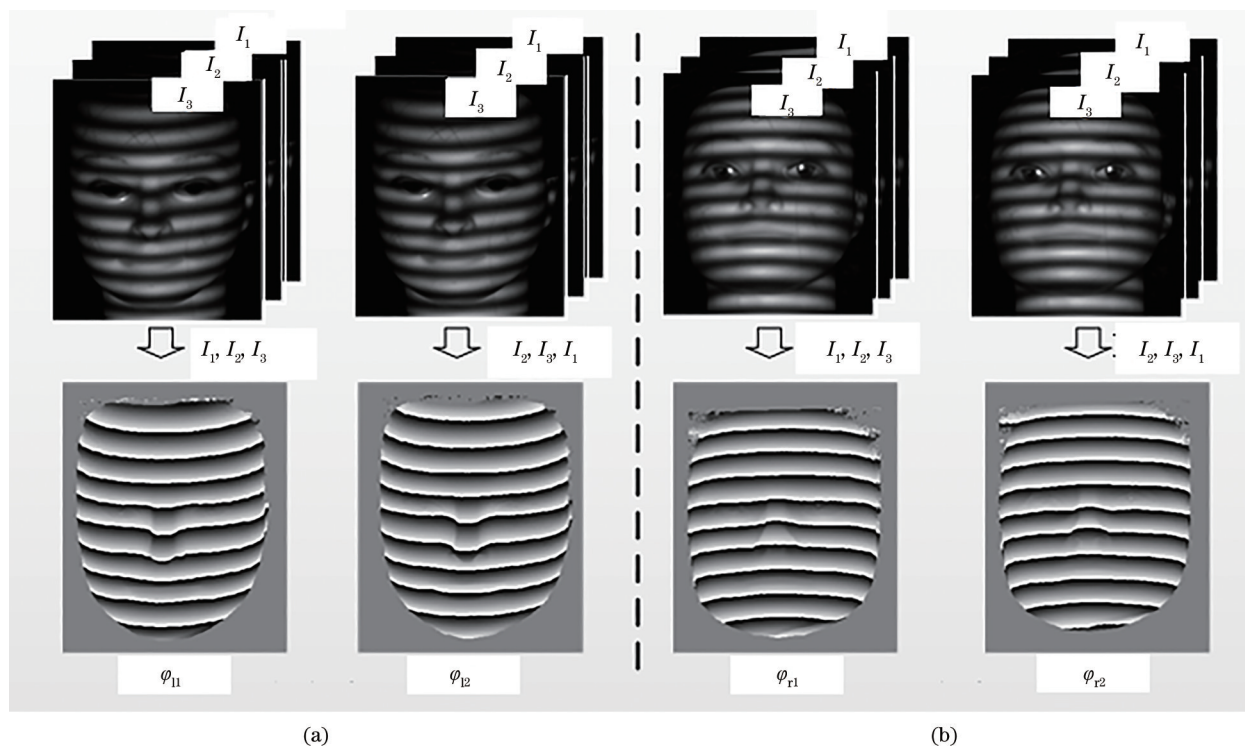


图 9 待测人脸的变形光栅条纹。(a)左相机;(b)右相机

Fig. 9 Deformed grating stripes of the face to be tested. (a) Left camera; (b) right camera

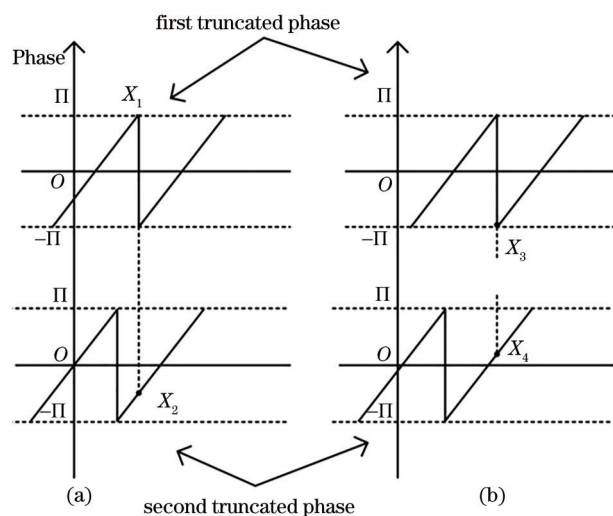


图 10 截断相位分界处的处理。(a)截断相位最大点;
(b)截断相位最小点

Fig. 10 Processing of the truncated phase boundary.
(a) Maximum point of wrapped phase map;
(b) minimum point of wrapped phase map

1) 在图 10(a)中, 第一组截断相位场中分界处相位值的突变点 x_1 是相位周期的最大值点, 无法获取其右邻域内的相位信息, 但可以对应匹配到第二组截断相位图中连续周期区间内的点 x_2 。

2) 在图 10(b)中, 无法获取相位场分界处相位最小值点 x_3 左邻域内的相位信息, 但可以对应匹配到第二组截断相位图中连续周期区间内的点 x_4 。

3) 通过截断相位突变点处理方法解决了相位分界点 x_1 和 x_2 处相位信息的突变问题, 匹配到对应连续区间内的点 x_3 和 x_4 , 再对其进行相位线性插值亚像素精匹配。

本方法在立体匹配过程中分为两步, 其中, 散斑粗匹配和正弦条纹相位辅助精匹配均能获得待测物视差, 如图 11 所示。可以发现, 相比单纯通过 2 帧散斑初匹配得到的视差, 正弦条纹截断相位辅助精匹配后处理填充了视差空洞, 建模的人脸更完整, 建模精度更高。

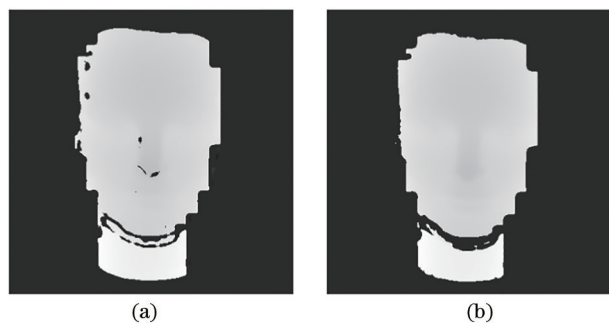


图 11 待测模特人脸的建模视差图。(a)粗匹配;(b)精匹配
Fig. 11 Modeling disparity map of the face of the model to be tested. (a) Coarse matching; (b) fine matching

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

实验程序采用 C++ 语言,算法实现基于 Visual Studio 2013 集成开发环境。实验平台如图 12 所示,系统由两个红外相机(帧率为 120 frame/s,分辨率为 1280 pixel×1024 pixel,配套焦距 $f=8$ mm 的镜头),一个红外投射器(投影分辨率为 912 pixel×1140 pixel)以及一个彩色相机(帧率为 120 frame/s,分辨率为 1280 pixel×1024 pixel,配套 $f=8$ mm 的镜头)组成。其中,两个红外相机组成双目立体相机,彩色相机作为纹理相机,红外投射器投射混合调制结构光到被测物体上,相机接收投射器的外触发信号并同步采集被结构光照明的物体图像,采集的图像数据被保存到 PC 端进行三维重建。

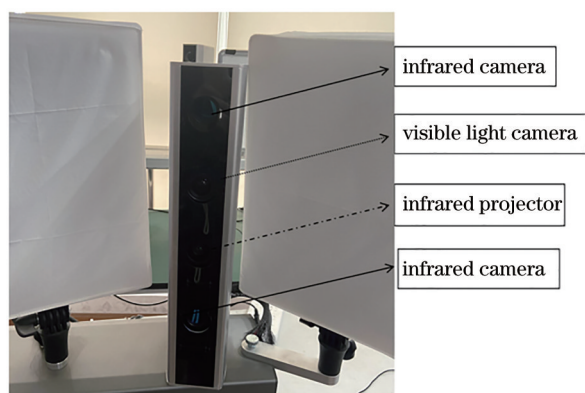


图 12 实验平台
Fig. 12 Experiment platform

在匹配计算前先对相机使用标定板进行标定,并根据张正友标定方法^[16]存储标定参数。为了验证该系统的性能,设置的工作距离为 80 cm。散斑立体匹配的匹配窗口尺寸过大会导致计算量增大,过小会导致区域内灰度特征信息不完整,造成误匹

配。综合考虑后,实验中选取的匹配窗口尺寸为 13 pixel×13 pixel,用人脸模特作为被测对象。

3.2 实验结果

多频相移法^[17]对多频条纹相位进行计算,获取的三维模型精度较高。为验证本方法的性能,用哑铃规作为标准件,分别采用三频三步相移(TFTS)法^[18]和本方法对其进行三维重建,建模结果的误差如表 1、表 2 所示。对比哑铃规球心距以及球的直径误差可以发现,本方法的重建精度与 TFTS 法相当,可实现高精度测量。

表 1 球心距的测量结果

Table 1 Measurement results of distance of sphere centre

Measure time	TFTS		Ours	
	Error / mm	Error ratio / %	Error / mm	Error ratio / %
1	0.0199	1.99	0.0202	2.02
2	0.0458	4.58	0.0361	3.61
3	0.0327	3.27	0.0453	4.53
Mean	0.0328	3.08	0.0339	3.39

表 2 右球直径的测量结果

Table 2 Measurement results of the diameter of right ball

Measure time	TFTS		Ours	
	Error / mm	Error ratio / %	Error / mm	Error ratio / %
1	0.0226	0.045	0.0346	0.068
2	0.0522	0.103	0.0271	0.053
3	0.0708	0.139	0.1012	0.199
Mean	0.0485	0.096	0.0543	0.107

为验证本方法在三维重建时的速度与精度,将本方法重建的点云模型与单纯利用 2 帧待测人脸散斑图案(方法 I)、5 帧待测人脸散斑图案(方法 II)和 12 帧待测人脸条纹图案(方法 III)的建模结果进行对比分析,如图 13 所示。其中,图 13(a)为相机采集的待测模特人脸纹理图。可以发现:方法 I 和方法 II 都是单纯利用散斑图案灰度区域相关算法进行匹配计算,重建的三维点云模型中人脸部分较为完整,如图 13(b)、图 13(c)所示;方法 II 的建模精度明显高于方法 I,但在眼睛、鼻孔颜色较黑的区域存在建模不完整、空洞现象,面部以及额头大面积区域出现了波纹;方法 III 采用 TFTS 法进行相位展开,重建精度较高,如图 13(f)所示;本方法解决了散斑建模出现的空洞和面部波纹现象,重建人脸表面比较光滑,相对于单纯采用散斑重建人脸模型的精度较高,如图 13(d)和图 13(e)所示。

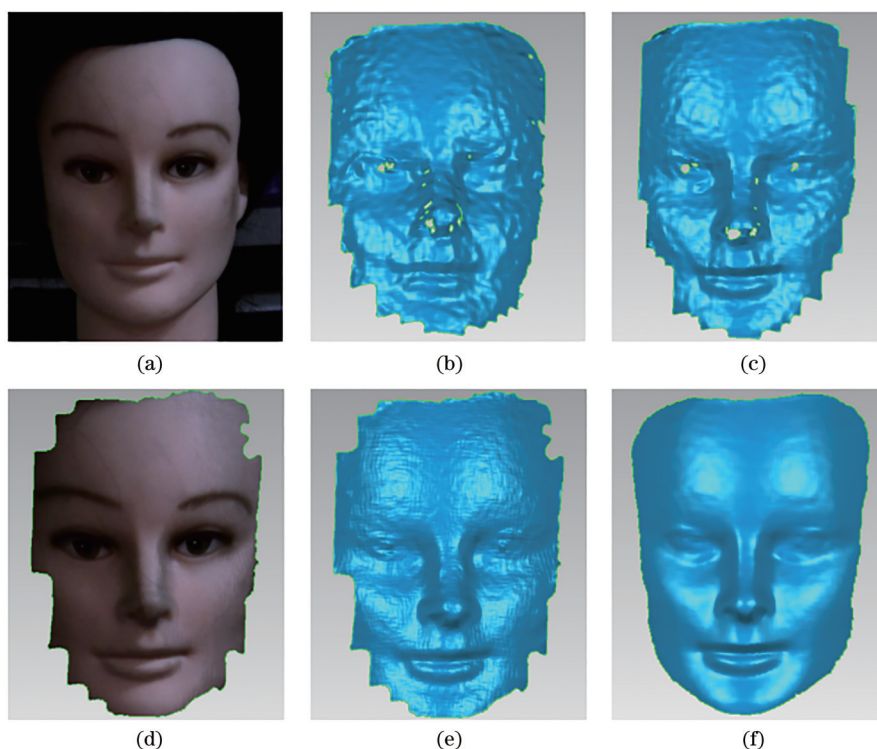


图 13 不同方法的建模结果。(a)待测人脸纹理图;(b)方法 I;(c)方法 II;(d)本方法的贴纹理建模结果;(e)本方法的建模结果;(f)方法 III

Fig. 13 Modeling results of different methods. (a) Texture map of the face to be tested; (b) method I; (c) method II; (d) modeling results of texture sticking of our method; (e) modeling results of our method; (f) method III

为了进一步对比上述方法的建模精度,将方法 I、方法 II 和本方法的建模结果与方法 III 的多帧条纹建模结果进行拟合对比,其平均距离和标准偏差如表 3 所示。可以发现,随着散斑图数量的增加,方法 I 和方法 II 拟合结果的平均距离以及标准偏差均减小,精度也有所提升,但标准偏差都在 0.1 mm 以上。本方法相比单纯采用散斑的建模拟合结果,精度有进一步提升,且标准偏差均小于 0.1 mm。

表 3 不同方法的人脸建模误差

Table 3 Face modeling errors of different methods

Method	Average distance	Standard deviation
Method I	0.326626	0.110129
Method II	0.294924	0.101619
Ours	0.245987	0.092571

表 4 为四种方法进行三维重建的时间。可以发现,方法 I 和方法 II 只需要采集待测物散斑图案并

表 4 四种方法的建模时间

Table 4 Modeling time of four methods

Method	Method I	Method II	Method III	Ours
Time	2.8	3.1	12.2	5.2

通过灰度区域相关算法进行匹配重建,消耗时间较短,但重建精度较差;方法 III 需要投影多帧正弦光栅图像,再利用相移法和多频法对多个不同周期的正弦光栅图像相位值作差,进行解包裹、相位展开,重建精度较高,但涉及算法复杂,投射结构光数目较多,消耗时间较长。本方法所用的时间比方法 III 快 7 s,且在保证精度的情况下,只需要采集 5 帧待测物图像,根据 2 帧散斑图案进行像素点初始匹配,再利用 3 帧正弦条纹图计算两组相位信息进行线性插值亚像素精匹配,最后获得完整的待测物体三维信息。

4 结 论

提出了一种联合散斑与相位混合光场调制的三维重建方法,并将其应用于双目视觉系统中。该方法先对散斑图像对进行立体匹配,通过采集的相移条纹图像解析出两组截断相位信息;然后对粗视差进行精确计算,不用展开相位,只在连续区间内进行插值亚像素匹配,即可得到高精度三维数据。相比传统方法,本方法不仅平衡了三维测量中速度与精度的关系,还解决了匹配点出现在截断相位周

期分界附近时容易导致错误匹配的问题。实验结果表明:相比多频法,本方法只需要采集 5 帧图像就能达到较高的精度,大大缩短了采集时间;在投影帧数相同的情况下,相比散斑立体匹配法,本方法的建模精度更高,计算时间更短。这表明本方法可应用到动态测量的场合中,具有较大的工程化应用价值。

参 考 文 献

- [1] 冯益春. 三维数字图像相关法中散斑质量评价和立体匹配技术研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
Feng Y C. The evaluation of speckle quality and the research of stereo matching in three-dimensional digital image correlation method[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.
- [2] 潘创, 刘乙奇, 黄道平. 基于激光散斑的实时立体匹配算法及其应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 22-28.
Pan C, Liu Y Q, Huang D P. Laser speckle-based real-time stereo matching algorithm and its application [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(8): 22-28.
- [3] 古家威, 谢小鹏, 曹一波, 等. 基于激光散斑的半稠密深度图获取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304004.
Gu J W, Xie X P, Cao Y B, et al. A semi-dense depth map acquisition algorithm based on laser speckle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304004.
- [4] 谢宜江, 傅可人, 冯子亮, 等. 基于散斑立体匹配的快速三维人脸重建[J]. 光电子·激光, 2019, 30(1): 61-69.
Xie Y J, Fu K R, Feng Z L, et al. Fast 3D face reconstruction by speckle stereo matching[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2019, 30(1): 61-69.
- [5] 毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 628-640.
Mao C L, Lu R S, Dong J T, et al. Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 628-640.
- [6] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
- [7] 马晓航, 朱昕玲, 边心田. 应用三步相移法的三维形面测量[J]. 光电技术应用, 2014, 29(4): 65-68.
Ma X H, Zhu T L, Bian X T. Three-dimensional surface figure measurement based on three step phase-shifting[J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(4): 65-68.
- [8] 戴鲜强, 盖绍彦, 达飞鹏. 基于相位信息辅助的散斑匹配三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2792-2800.
Dai X Q, Gai S Y, Da F P. Three-dimensional shape measurement method based on speckle pattern with prior phase information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2792-2800.
- [9] 周佩, 朱江平, 孔令寅, 等. 基于旋转散斑结构光投影的三维人脸采集[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0415019.
Zhou P, Zhu J P, Kong L Y, et al. Three-dimension face acquisition with rotating speckle structured light projection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0415019.
- [10] 周佩, 朱江平, 荆海龙, 等. “S”型二元编码的正弦结构光模板设计与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 151203.
Zhou P, Zhu J P, Jing H L, et al. Design and experimental study of sinusoidal structured light mask with “S” shaped binary coding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 151203.
- [11] 杨志光, 张永林, 谢经明, 等. 基于双目视觉和约束条件的行人目标定位[J]. 中国机械工程, 2016, 27(23): 3171-3175.
Yang Z G, Zhang Y L, Xie J M, et al. Target positioning of pedestrian based on binocular vision and constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(23): 3171-3175.
- [12] 于春和, 张静. 基于SAD的立体匹配算法研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(4): 77-83.
Yu C H, Zhang J. Research on SAD-based stereo matching algorithm[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(4): 77-83.
- [13] Heshmat S, Tomioka S, Nishiyama S. Phase unwrapping algorithm based on singularity compensation for three-dimensional shape measurement[J]. Optical Review, 2012, 19(6): 444-450.
- [14] Wang J H, Yang Y X. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection [J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 616-627.
- [15] 张吴明, 钟约先, 李仁举. 投影栅三维形面测量中亚像素匹配算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),

- 2008, 48(3): 412-414.
- Zhang W M, Zhong Y X, Li R J. Sub-pixel matching algorithm for projected grating 3-D surface measurements[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008(3): 412-414.
- [16] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] 徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(3): 537-540.
- Xu Z H, Su X Y. An algorithm of temporal phase unwrapping[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(3): 537-540.
- [18] 赵文静, 陈文静, 苏显渝. 几种时间相位展开方法的比较[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(1): 110-117.
- Zhao W J, Chen W J, Su X Y. The comparison of several time phase unwrapping methods[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2016, 53(1): 110-117.