

# 基于双目立体视觉与结构光的便携式非接触 三维掌纹采集系统

陈亦麟, 王发宇, 刘建阳\*

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031

**摘要** 随着三维测量技术的成熟,非接触式三维(3D)掌纹采集系统为掌纹识别的研究提供了新的途径。为了提高 3D 掌纹信息的采集精度,提出一种融合双目立体视觉与结构光的便携式非接触 3D 掌纹采集系统。首先将编码图案投影到目标手掌表面,使用双目相机获取左右视图后,采用格雷码-相移法获取目标的绝对相位信息,然后引入波义耳投票算法进行最大概率校正以降低视差图中的跳变噪声,经过亚像素级立体匹配和双目相机的立体标定后,得到 3D 掌纹信息。最后在自行搭建的一套便携式 3D 掌纹采集系统上进行实验,实验结果表明,该方法相比于传统基于双目立体视觉的 3D 掌纹采集系统,能提高掌纹的采集精度,获得更好的三维掌纹重建效果。

**关键词** 图像处理; 双目立体视觉; 结构光; 格雷码-相移法; 立体匹配; 三维掌纹采集

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0410016

## Non-Contact Portable Three-Dimensional Palmprint Acquisition System Based on Binocular Stereo Vision and Structured Light

Chen Yilin, Wang Fayu, Liu Jianyang\*

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

**Abstract** With the maturity of three-dimensional (3D) measurement technology, a non-contact 3D palmprint acquisition system provides a new way for palmprint recognition. In order to improve the accuracy of 3D palmprint information acquisition, a non-contact portable 3D palmprint acquisition system based on binocular stereo vision and structured light is proposed. Firstly, the coding pattern is projected onto the surface of the palm of the target, and the binocular camera is used to obtain the left and right views. The Gray code-phase shift method is used to obtain the absolute phase information of the target. Then the Boyle Moore voting algorithm is introduced for maximum probability correction to reduce the jump noise in the disparity map. After sub-pixel stereo matching and stereo calibration of the binocular camera, the 3D palmprint information is obtained. Finally, experiments are carried out on a set of self-built portable 3D palmprint acquisition systems. The experimental results show that compared with the traditional 3D palmprint acquisition system based on binocular stereo vision, this method can improve the palmprint acquisition accuracy and obtain better 3D palmprint reconstruction effect.

**Key words** image processing; binocular stereo vision; structured light; Gray code-phase shift method; stereo matching; three-dimensional palmprint acquisition

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-03-11; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 四川省科技厅项目(2017HH0102)

通信作者: \*manchest@swjtu.edu.cn

## 1 引言

掌纹是手掌内侧表面上纹线的统称,其范围为手指根至手腕,包含了主线、皱褶、三角点、细节点等特征<sup>[1]</sup>。与指纹采集相比,掌纹采集的图像面积更大,纹理特征更丰富,所需采集设备的分辨率更低,即使在低分辨率( $\leq 100$  dpi, 1 dpi 指单位尺寸上的像素个数)的掌纹图像中,也能提取到掌纹中的主线和皱褶特征。但是 2D 掌纹图像容易被伪造,采集设备针对 2D 掌纹图像的认识率容易受到外界光照变化的影响<sup>[2-3]</sup>。随着三维重建技术的发展,Aggithaya 等<sup>[4]</sup>在 2008 年首次提出 3D 掌纹的概念。3D 掌纹包含了 2D 掌纹信息不具备的深度信息,而且其受光照等因素的影响较小,难以被伪造。近年来,国内外的研究者设计并研制了各种 3D 掌纹采集系统,这些系统主要可以分为以下 4 类:1) 接触式 3D 掌纹采集系统;2) 非接触式 3D 掌纹采集系统;3) 有约束的 3D 掌纹采集系统;4) 无约束的 3D 掌纹采集系统。2009 年,香港理工大学的 Zhang 等<sup>[5]</sup>设计了一种接触式、有约束的基于单目相机的结构光 3D 掌纹采集系统。该采集装置主要由一台 CCD 相机、LCD 投影系统组成,采集掌纹信息时,要求手掌接触机器放在固定的测量位置来完成 3D 掌纹信息的重建。同时该研究团队还提供了由该装置采集的 2D 掌纹和 3D 掌纹构成的数据集。2011 年,香港理工大学的 Kanhangad 等<sup>[6]</sup>使用 Minolta VIVID 910 三维扫描仪来构建 3D 掌纹采集系统,该系统通过激光扫描的方式实现掌纹的三维重建,手掌无需接触且无约束。同样地,该研究团队也提供了由采集结果构成的 3D 掌纹数据库。2020 年,河北工业大学的 Bai 等<sup>[7]</sup>也研制了基于单目相机和投影仪的结构光 3D 掌纹采集系统,采集系统主要由一台彩色 CCD 相机、一台 DLP(digital light procession)投影仪构成,采集掌纹时手掌无需接触且无约束。2017 年,Bingöl 等<sup>[8]</sup>研制了主要由两个 CMOS 相机构成的立体视觉系统,通过提取 SURF 特征点来进行 3D 掌纹的识别,但是该系统没有实现对掌纹感兴趣区域(ROI)的 3D 重建,实时性也不够理想。2020 年,清华大学深圳国际研究生院的张昆霄等<sup>[9]</sup>发明了一套光学结构复杂的 3D 掌纹采集系统。在该系统中,利用分光镜将镜头组捕捉的光进行分光,利用普通相机和深度相机分别采集掌纹的二维 RGB 图像和手掌的深度图,然后结合二

维 RGB 掌纹图像和深度图在图像处理模块中计算出 3D 掌纹点云,最后对掌纹的三维点云进行校正和 ROI 提取。该系统相比于传统的 3D 掌纹采集装置,能显著地提高掌纹 ROI 提取的稳定性,但是该系统结构复杂,成本较高。

综上所述,上述 3D 掌纹采集系统为掌纹信息识别技术的研究提供了新的途径,与 2D 掌纹信息<sup>[10-11]</sup>相比,3D 掌纹信息提供了掌纹的深度信息,受光照等因素的影响较小,可提高掌纹识别的准确度<sup>[12-13]</sup>。为了降低 3D 掌纹采集系统的结构复杂性,提高系统的采集精度,本文提出了一种基于双目立体视觉与结构光视觉的便携式非接触 3D 掌纹采集系统。该系统综合了双目立体视觉采集系统和单目视觉结构光系统的优点,通过在搭建的便携式 3D 掌纹采集系统上进行实验,证明本文提出的系统结构简单,与传统的双目立体视觉采集系统相比具有较高的三维重建精度。与单目相机结构光系统相比,投影仪配置灵活且无需标定,具有广阔的应用前景。

## 2 基于双目立体视觉与结构光视觉的 3D 掌纹采集系统

### 2.1 系统结构

本文提出的融合立体视觉和结构光的 3D 掌纹采集系统的结构如图 1 所示。系统由两个工业相机(camera 1 和 camera 2)和一个 DLP 投影仪组成。利用 DLP 投影仪向目标物体表面投射结构光条纹以增加纹理信息,使用左、右双目相机获取左右视图信息,进行相机标定和立体匹配后,得到待测目标的三维点云。在这个过程中,利用投射到物体表面的纹理信息能解决传统立体双目相机在被动式立体匹配时纹理不足导致的误匹配问题。该系统的优点是在标定完两个相机的参数后,投影仪不需要进行标定,投影仪的相对位置和投影角度可以根据实际测量场景进行调整,系统的灵活性和可操作性强。

### 2.2 基于格雷码-相移法的编码方案

为了能在三维重建时对表面特征单一的物体进行高精度的立体匹配,常采用主动投影条纹图案的三维测量技术。本文待测的目标为手掌掌纹,其纹理较少,表面特征单一,因此本文采用主动投影条纹图案的三维测量技术。常用的条纹编码方法主要有时间编码、空间编码和直接编码<sup>[14]</sup>。本文采用的格

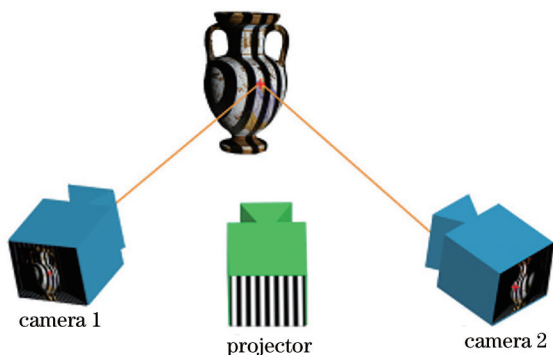


图 1 双目结构光系统结构

Fig. 1 Structure of binocular structured light system

格雷码属于时间编码的一种,具有较高的可靠性和鲁棒性,但是分辨率较低,难以对图像进行细分。格雷码编码中常投影如图 2 所示的纵向、横向格雷码图案序列以对图像中的目标区域进行唯一编码。

以一个玩具模型的三维信息采集过程为例,首先向目标区域投影 10 张横向格雷码和 10 张反向格雷码图案,接着投影 10 张纵向格雷码和 10 张反向格雷码图案,最后投影全白、全黑的图案。经过立体匹配后得到的玩具模型三维重建效果如图 3(a)

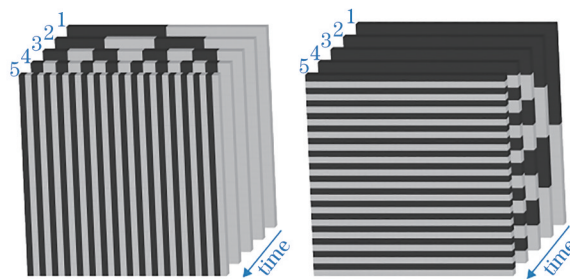


图 2 纵向和横向格雷码编码图案

Fig. 2 Vertical and horizontal Gray-coded patterns

所示,因为对每一像素进行了唯一编码,条纹宽度过窄,无法对条纹进行区分,立体匹配后的三维重建效果较差。由图 3(b)和图 3(c)可知,若不对每一像素进行编码,可减少投影的格雷码图案数量,条纹可以清晰地被区分,三维重建效果可得到改善,但三维重建图像的分辨率较低。由此可知,格雷码的原理和实现简单,但随着细分数的增加,条纹宽度变得越窄和不易被区分,单一地使用格雷码需要投影的图案数量过多,不适合对图像进行高分辨率细分,因此使用单一的格雷码获取掌纹的三维信息时精度受限。

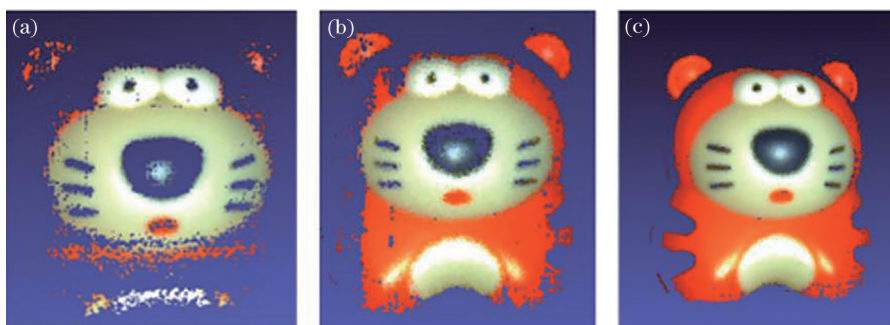


图 3 使用单一的格雷码得到的三维重建效果。(a)使用 10 张格雷码图片;(b)使用 9 张格雷码图片;(c)使用 8 张格雷码图片  
Fig. 3 3D reconstruction results obtained by using single Gray code. (a) Using 10 Gray-code pictures; (b) using 9 Gray-code pictures; (c) using 8 Gray-code pictures

时间编码中的相移法是条纹图像研究领域最重要的技术之一<sup>[15]</sup>。该方法根据时序投射正弦周期相移图案以获取经物体高度调制后的相位信息后,通过解相位来得到物体的三维信息。与格雷码相比,相移法投射的图案数量较少,分辨率高,待测目标点的相位值不容易受相邻点光强值的影响,而且能克服格雷码条纹过窄而难以被检测到的缺点,但相移法的缺点是解相位过程相对复杂。根据投射图案的数量,相移法可分为  $N$  步,即连续投射  $N$  幅相移图。通常投射图案的数量越多,测量分辨率越高,测量速度越慢。四步相移法中图案相位相差

$90^\circ$ ,是目前应用最广泛的一种相移法,该方法的计算简单,并且能消除检测器的偶次谐波含常数项的影响<sup>[16]</sup>。使用四步相移法直接求得的相位截断在  $[-\pi, \pi]$  之间,是不连续的,需要对相位进行解相得到每一点的绝对相位。

目前常用的解相位算法有格雷码法、格雷码相移法、多频外差法等。近年来,格雷码与相移法相结合的技术被广泛应用于漫反射目标的测量,与单一的格雷码或相移法相比,该方法具有更强的稳健性<sup>[17]</sup>。因此本文采用的解相法是 Bergmann<sup>[18]</sup> 提出的格雷码与相移结合的方法,该方法首先投影格雷

码图案,采用格雷码粗略地对区域进行划分。通过计算出格雷码对应的周期后,再投射相移图案就可以对格雷码图案的最小周期区域进行二次细分。格雷码辅助解相位的过程如图 4 所示,通过格雷码计算出周期数,便可以将解相前的相对相位转换为绝对相位。

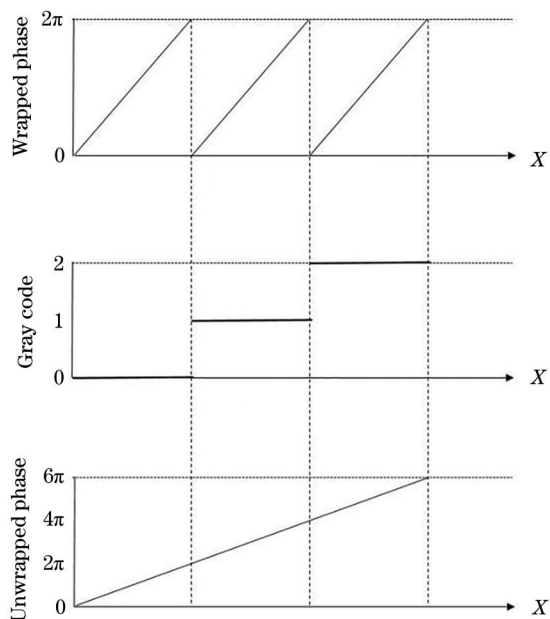


图 4 格雷码辅助解相位

Fig. 4 Gray code assisted phase unwrapping

### 2.3 基于最大概率法的周期跳变校正

在使用格雷码-相移法解相位时,理论上需要格雷码图案与相移图案的边界严格对齐。但在实际测量中,格雷码二值化引起的误差会导致格雷码解码出错,计算出的周期与相位周期不会完全重合,从而会引起周期跳变,最终使得绝对相位的计算出错。因此,在解相位前需要对格雷码周期和相位周期进行校正。常用的周期跳变校正的方法有传统校正法<sup>[19]</sup>和最大概率法<sup>[20]</sup>。边缘区域存在明显的噪声时,使用传统校正法会令后续所有像素点的格雷码值错误地叠加,从而导致后续像素点匹配错误。使用最大概率法获取两个相邻的相对相位突变点之间所有像素的格雷码值,将格雷码值中出现频次最多的数值赋给整组像素,可以简单高效地消除边缘区域的跳变。本文引入波义耳摩尔投票算法<sup>[21]</sup>选取众数来降低最大概率法的复杂度。未进行周期跳变校正、传统方法校正、最大概率校正的视差图结果如图 5 所示,图 5(a)中的纵向条纹为格雷码条纹边缘解码错误导致的视差值错误。图 5(b)中的横向条纹表示传统方法遇到较大噪声后,后续的周期跳变校正的错误结果。图 5(c)为采用最大概率校正法的结果,其效果较为理想。因此本文选用最大概率法对周期跳变进行校正。



图 5 周期跳变校正的视差图。(a)校正前图像;(b)使用传统方法校正后的图像;(c)使用最大概率法校正后的图像

Fig. 5 Disparity maps of periodic jump correction. (a) Image before correction; (b) corrected image by traditional method; (c) corrected image by maximum probability method

### 2.4 基于相位线性插值的亚像素级立体匹配

在校正完周期跳变后,需要对双目立体相机获取的左右视图进行立体匹配。由于左、右相机在获取目标图像时的位置、角度不同,加上噪声、环境光等因素的干扰,因此难以在像素级的左、右视图中找到绝对相位完全相等的像素点。为了解决这个问题,本文采用基于相位线性插值的亚像素级的立体匹配方法<sup>[22]</sup>。假设双目相机系统已经过立体校正,并且极线水平。以左视图为基准,在右视图中

寻找对应点。左视图中某像素点的绝对相位值在右视图中同一行的 2 个相邻像素点之间,线性插值如图 6 所示。

图 6 中  $X_l$  为左图上的待匹配点,  $X_r$  与  $X_{r+1}$  为右

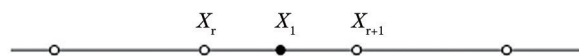


图 6 右视图像素点的线性插值示意图

Fig. 6 Linear interpolation diagram of right view pixels

图像上的相邻点,绝对相位值  $\phi_u(X_r) < \phi_u(X_1) < \phi_u(X_{r+1})$ 。因为感光像素尺寸较小,相邻像素间的

相位值可近似为线性分布,在像素  $X_r$  与  $X_r + 1$  间插值,计算  $X_1$  在右图中的亚像素匹配点  $X_{sub}$ :

$$\begin{cases} X_{sub} = X_r + \frac{\phi_u(X_1) - \phi_u(X_r)}{\phi_u(X_{r+1}) - \phi_u(X_r)} (X_{r+1} - X_r), & \phi_u(X_r) \neq \phi_u(X_{r+1}) \\ X_{sub} = X_r, & \phi_u(X_r) = \phi_u(X_{r+1}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $X_{r+1} - X_r = 1$ 。将左视图中的像素点与右视图中的亚像素点进行匹配后,求出非整数值的视差,最后计算三维坐标。图 7 对比了在三维重建后像素级[图 7(a)]和亚像素级[图 7(b)]匹配的点云效果,可见像素级匹配生成的点云有明显的分层现象,而亚像素级匹配生成的点云未出现明显的分层。

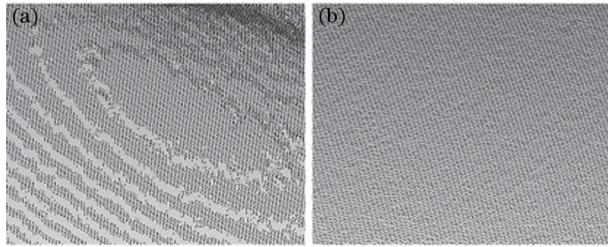


图 7 点云效果对比图。(a)像素级匹配;(b)亚像素级匹配  
Fig. 7 Point cloud effect comparison. (a) Pixel-level matching; (b) sub-pixel-level matching

图 8 所示为像素级匹配[图 8(a)]和亚像素级匹配[图 8(b)]后手掌模型表面重建图像的对比,结果同样表明,亚像素级匹配后手掌的三维重建图像更加清晰。

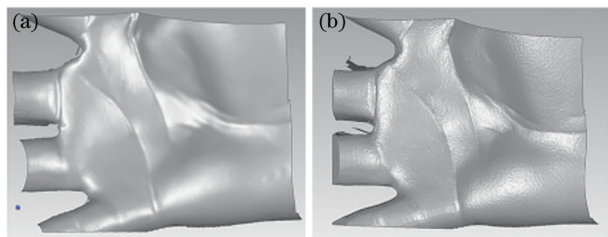


图 8 手掌表面重建效果对比图。(a)使用像素级匹配;  
(b)使用亚像素级匹配  
Fig. 8 Comparison of palm surface reconstruction effects. (a) Using pixel-level matching; (b) using sub-pixel-level matching

### 3 实验和结果分析

#### 3.1 实验参数设置

为了验证本文提出的方法,搭建了一套便携式的掌纹采集实验系统。该系统采用的相机采集模块由两台型号为 HT-U300C 的工业彩色相机构成,

选择镜头的型号为 XG-FV1212。投影模块采用 DLP 投影仪,型号为奥图码 PK301 微型投影仪。

首先调节投影仪 PK301 的焦距,使其在距镜头 400 mm 左、右处分别得到清晰的图像,像面尺寸约为 221 mm × 125 mm。根据投影像面尺寸,调整左右相机的内参数和空间几何参数,使得光轴与基线的夹角  $\alpha$  约为 70°,相机间基线长度  $B$  约为 188 mm。系统在采集图像时,由于待测物体反光,正弦光栅图案可能会出现过饱和等现象,因此需要将相机的曝光时间和增益倍数调节到合适的数值。设置相机的曝光时间为 50 ms,增益倍数为 1,搭建好的便携式 3D 掌纹采集系统如图 9 所示。为了与传统基于立体双目相机的被动式 3D 掌纹采集系统进行比较,将本文方法与基于立体双目相机的 3D 掌纹采集系统中常用的半全局立体匹配(SGBM)算法<sup>[23]</sup>进行对比实验。

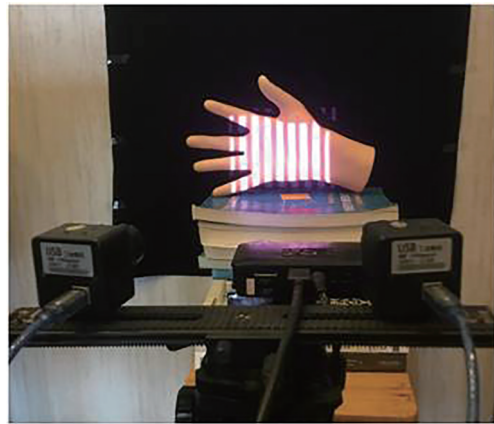


图 9 3D 掌纹采集系统  
Fig. 9 3D palmprint acquisition system

#### 3.2 实验结果

使用 Matlab 的 Stereo Camera Calibrator App 对立体双目相机进行标定,参考文献[24]中提出的标定图像的采集数量,标定图像的采集数量大于 13 张时的系统标定误差趋于稳定。因此本文在标定时,采集的标定图像为 14 幅。选用的标定板精度为 0.01 mm,型号为 GP070 12 × 9,标定误差结果如图 10 所示,立体相机标定的全局平均误差为

0.10 pixel。

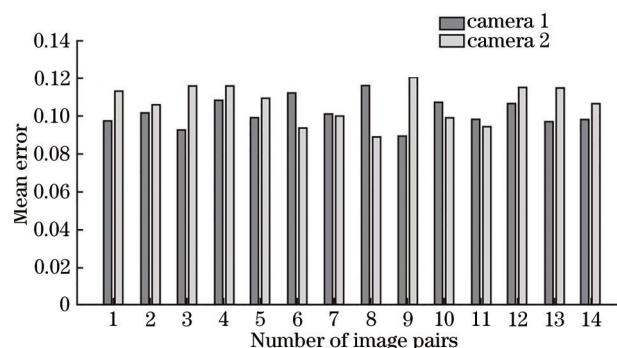


图 10 立体相机的标定误差

Fig. 10 Calibration error of stereo camera

利用 Matlab 生成 6 幅格雷码图案,将投影区域分割为 26 个区域,每个区域的像素宽度为 16 pixel,对于格雷码分割成的每个区域,使用 4 幅相移图案进行像素级的二次精确细分。使用正反格雷码图案进行二值化操作,此时需要投影的图案数量为 16。投影的 16 幅图案如图 11 所示。在投影时,当条纹周期宽度取 16,背景光强、条纹对比度灰度值都为 127.5 时,投影的图案效果较为理想。

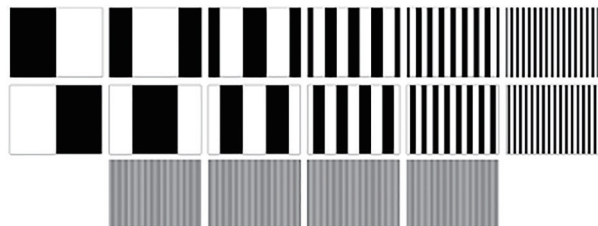


图 11 投影的图案

Fig. 11 Projected patterns

采集过程中采用手模进行实验,图 12(a)、(b)分别为左、右相机采集的第一幅相移图像,图 13(a)、(b)分别为左、右相机经立体校正后的图像。

在进行格雷码-相移法解码时,具体方法为:计

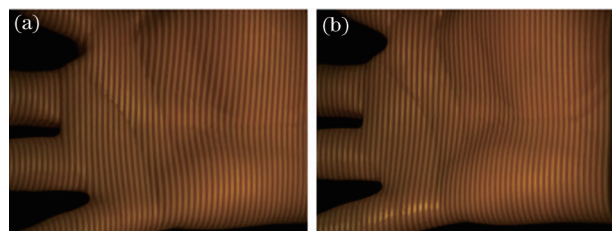


图 12 校正前左、右相机采集的图片。(a)左相机;(b)右相机  
Fig. 12 Images obtained by left and right cameras before correction. (a) Left camera; (b) right camera

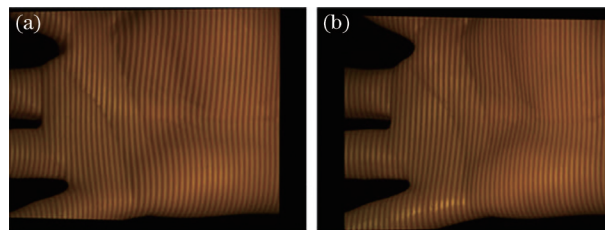


图 13 经校正后左、右相机采集的图片。(a)左相机;(b)右相机  
Fig. 13 Images obtained by left and right cameras after correction. (a) Left camera; (b) right camera

算同一像素点在 4 幅相移图中灰度的平均值  $I_{avg}$ ,若  $I_{avg} < 10$ ,该像素点处于阴影区域。也可另外投影两幅全白、全黑图案,计算同一像素点在两幅图案间的灰度变化值,若变化值小于阈值,则该像素点处于阴影区域。由于阴影区域无需解码,所以首先对阴影区域进行计算以减少计算量。对于不处于阴影区域的像素点,根据四步相移法计算相对相位,在格雷码解码后计算出区域的周期值,基于相对相位和周期值计算绝对相位。以左相机采集的图像为例,处理过程如图 14 所示。其中,图 14(b)为绝对相位图像中每行从左向右递增的绝对相位值。

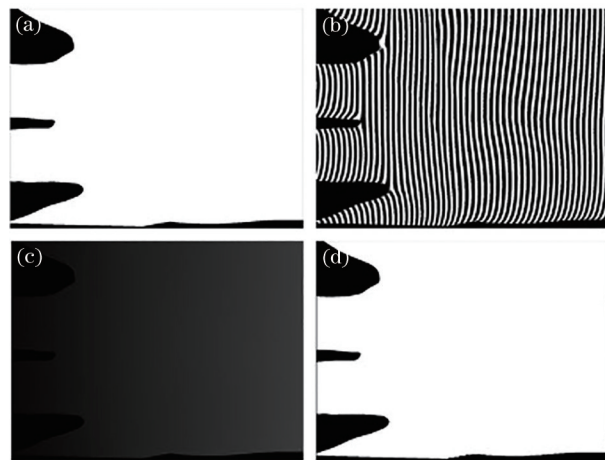


图 14 左相机拍摄图像的格雷码相移解码结果。(a)阴影区域;(b)相对相位;(c)周期;(d)绝对相位

Fig. 14 Gray code phase shift decoding results of image taken by left camera. (a) Shadow area; (b) relative phase; (c) period; (d) absolute phase

通过亚像素级匹配后可得 690433 对匹配点,得到的视差图和三维点云图如图 15 和图 16 所示。

重建的点云中包含了噪声、计算误差导致的离群点,采用基于统计学分析的滤波器对点云边缘的离群点进行滤波后,结果如图 17 所示。该滤波器方法可剔除离群点,从图 17(b)中可看出经过点云滤



图 15 视差图

Fig. 15 Disparity map

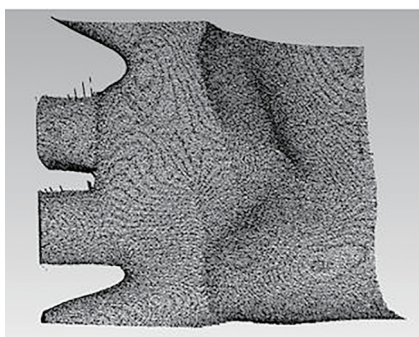


图 16 三维点云图

Fig. 16 Three-dimensional point cloud



图 17 点云滤波结果。(a)点云滤波前;(b)点云滤波后

Fig. 17 Point cloud filtering results. (a) Before point cloud filtering; (b) after point cloud filtering

波后,云边缘的离群点已被剔除。

进行点云滤波后,使用滑动最小二乘法进行点云平滑。最后使用快速三角法进行表面重建,结果如图 18 所示。

图 19 为基于立体双目视觉的被动式 3D 掌纹采集系统所采集的左右相机的手模图像,采用文献 [24] 中的方法对其进行立体匹配,生成的视差图如图 20(a) 所示。在同等条件下,本文提出的 3D 掌纹采集系统的实验结果如图 20(b) 所示。

对于传统的基于立体视觉的被动式 3D 掌纹采集系统而言,针对纹理较少的物体表面,采用 SGBM 算法完成立体匹配时,往往需要手动对算法参数进行调整,从而容易导致误匹配率较高。从

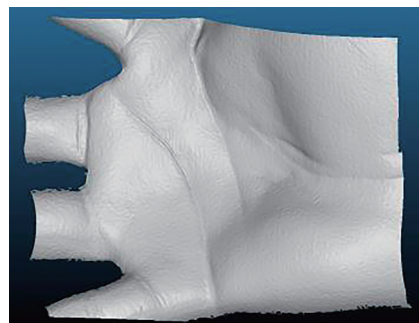


图 18 手掌表面的重建结果

Fig. 18 Reconstruction result of palm surface

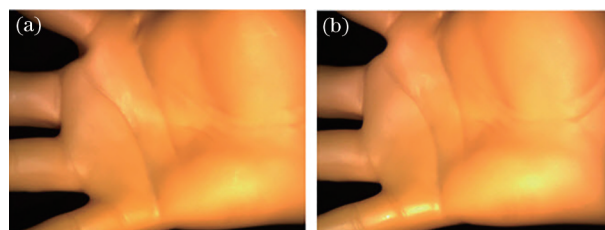


图 19 基于立体双目相机的 3D 掌纹系统采集的图像。

(a) 左视图;(b)右视图

Fig. 19 Images collected by 3D palmprint system based on stereo binocular camera. (a) Left view; (b) right view

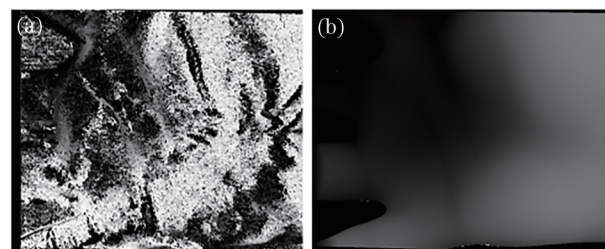


图 20 实验视差图对比。(a)传统双目立体视觉掌纹采集系统生成的视差图;(b)本文所提出的掌纹采集系统生成的视差图

Fig. 20 Comparison of experimental disparity maps. (a) Disparity map generated by traditional binocular stereo vision palmprint acquisition system; (b) disparity map generated by palmprint acquisition system proposed in this article

图 20(a) 中可以看出,立体匹配的效果明显较差,最终的三维重建结果也难以满足要求。而本文提出的基于结构光+立体视觉的 3D 掌纹采集系统,采用主动式立体匹配,既能够解决被动式立体匹配中纹理不足导致的误匹配问题,也能实现更稠密的三维重建,从而达到更好的采集效果。

综上所述,相较于传统的基于立体视觉的被动式 3D 掌纹采集系统而言,本文提出的主动式采集方法在实验中获得了更好的采集效果。

## 4 结 论

提出了一种基于双目立体视觉融合结构光的 3D 掌纹采集方法。针对传统基于双目立体视觉的 3D 掌纹采集系统在立体匹配时纹理不足导致的误差问题,从结构光条纹着手,利用格雷码-相移法获取目标的绝对相位信息,并基于波义耳摩尔投票算法进行最大概率校正,从而降低视差图中的跳变噪声,使用线性插值法实现亚像素级匹配,该方法也在一定程度上提高了掌纹的三维重建精度。基于此方法搭建了一套便携式的 3D 掌纹采集系统,与传统的基于双目立体视觉的 3D 掌纹采集系统相同,所提系统只需要对双目相机进行标定,但其在双目视觉系统中加入投影仪,从而构成了双目结构光系统。实验结果表明,所提系统能够更好地对手掌纹理不足带来的立体匹配误差问题,获得更好的 3D 掌纹采集效果。

### 参 考 文 献

- [1] Yue F, Zuo W M, Zhang D P. Survey of palmprint recognition algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(3): 353-365.  
岳峰, 左旺孟, 张大鹏. 掌纹识别算法综述[J]. 自动化学报, 2010, 36(3): 353-365.
- [2] Cui J R. The research on recognition and fusion methods based on multispectral and 2D/3D palmprint [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.  
崔金荣. 基于多光谱和 2D/3D 掌纹的识别与融合方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] Yang B, Wang X H, Yang X. 3D palmprint recognition based on local texture feature sets[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(12): 53-59.  
杨冰, 王小华, 杨鑫. 基于局部纹理特征的三维掌纹识别研究[J]. 光电工程, 2014, 41(12): 53-59.
- [4] Aggithaya V K, Zhang D, Luo N. A multimodal biometric authentication system based on 2D and 3D palmprint features[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6944: 106-114.
- [5] Zhang D, Lu G M, Li W, et al. Palmprint recognition using 3-D information[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2009, 39(5): 505-519.
- [6] Kanhangad V, Kumar A, Zhang D. A unified framework for contactless hand verification[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 1014-1027.
- [7] Bai X F, Meng Z Z, Gao N, et al. 3D palmprint identification using blocked histogram and improved sparse representation-based classifier[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(16): 12547-12560.
- [8] Bingöl Ö, Ekinçi M. Stereo-based palmprint recognition in various 3D postures[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 78: 74-88.
- [9] Zhang K A, Guo Z H. Palmprint acquisition device, method and image acquisition device: CN110705487A [P]. 2020-01-17.  
张昆霄, 郭振华. 掌纹采集设备、方法及其图像采集装置: CN110705487A [P]. 2020-01-17.
- [10] Li X C, Zhang C H, Lin S. Palmprint and palm vein feature fusion recognition based on BSLDP and canonical correlation analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051012.  
李新春, 张春华, 林森. 基于 BSLDP 和典型相关分析的掌纹掌脉融合识别[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051012.
- [11] Li X C, Ma H Y, Lin S. Palmprint recognition based on subspace and texture feature fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071007.  
李新春, 马红艳, 林森. 基于子空间与纹理特征融合的掌纹识别[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071007.
- [12] Bai X F, Huang S J, Gao N, et al. Person identification by using 3D palmprint data[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10025: 100250Q.
- [13] Bai X F, Gao N, Zhang Z H, et al. Three dimensional palmprint identification based on blocked ST and PCA[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(6): 631-637.  
白雪飞, 高楠, 张宗华, 等. 基于分块 ST 与主成分分析的三维掌纹识别[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(6): 631-637.
- [14] Pages J, Salvi J, Garcia R, et al. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling [C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422), September 14-19, 2003, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2003: 133-138.
- [15] Da F P, Gai S Y. Three dimensional precise measurement of grating projection[M]. Beijing: Science Press, 2011.  
达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] Yu X Y, Shan L N, Cao S N, et al. The review of structured light time encoding technologies[J]. Journal



- of Harbin University of Science and Technology, 2010, 15(1): 98-102.
- 于晓洋, 单鹂娜, 曹沈楠, 等. 结构光时间编码技术进展[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, 15(1): 98-102.
- [17] Feng J Y, Chen H Y, Shi C, et al. Three-dimensional measurement of highly-reflective surface using structured light technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221202.
- 冯建洋, 谌海云, 石础, 等. 基于结构光技术的高反射表面三维测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 221202.
- [18] Bergmann D. New approach for automatic surface reconstruction with coded light[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 1-9.
- [19] Wang B, Guo L. 3D measurement technology based on binocular stereo vision using Gray code and multi-step phase-shift structured light[J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(5): 25-28.
- 王兵, 郭玲. 基于格雷码和多步相移法的双目立体视觉三维测量技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(5): 25-28.
- [20] Wang C B, Xie M H. Binocular three-dimension reconstruction combined with Gray coding and phase-shift[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(5): 178-182.
- 王长波, 谢明红. 格雷编码与相移结合的双目三维重构[J]. *计算机工程*, 2013, 39(5): 178-182.
- [21] Boyer R S, Moore J S. MJRTY: a fast majority vote algorithm[M]//Boyer R S. *Automated reasoning. Automated reasoning series*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, 1: 105-117.
- [22] 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, 48(3): 412-414.
- 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.
- [23] Hirschmuller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 328-341.
- [24] Xiao Z T, Zhang W Y, Geng L, et al. Accuracy analysis of binocular vision system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 6-11.
- 肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. *光电工程*, 2014, 41(2): 6-11.