

基于结构光投影三维重建的人脸特征检测

夏晨旭¹, 郝群^{1,2*}, 张一鸣², 张韶辉², 李凡飞², 杨智慧², 孙建坤²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 人的面部结构信息具有非常高的独特性,通过对人脸进行三维测量和重建,所得数据可以用于人脸识别、医学整形等用途。利用结构光投影技术,通过投射特定编码的近红外光栅条纹到人脸,解算得到人脸的三维形貌。同时根据二维纹理图像进行人脸特征点的检测与识别,获取人脸关键特征点的分布。最后结合二维分布的特征点和三维的点云信息,实现对人脸关键特征信息的准确获取与理解,为未来三维人脸检测的应用,如医学医疗、人脸识别检测、虚拟人类的数据输入等提供参考。

关键词 结构光; 三维重建; 人脸特征检测; 近红外条纹

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230620

Face Feature Detection Based on Structured Light Projection Three-Dimensional Reconstruction

Xia Chenxu¹, Hao Qun^{1,2*}, Zhang Yiming², Zhang Shaohui², Li Fanfei², Yang Zhihui²,
Sun Jiankun²

¹School of Opto-Electronic Engineering, Chang Chun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The facial structure information of a person includes a high degree of uniqueness. Data obtained from 3D measurements and reconstruction of the face is useful in facial recognition and medical plastic surgery. In this study, structured light projection technology is used to project a specially coded near-infrared grating stripe onto the face to facilitate the calculation of a 3D appearance of the face. Simultaneously, the facial feature points are detected using 2D texture images, and the distribution of key facial feature points is obtained. Finally, accurate acquisition and understanding of key facial feature information is achieved by combining 2D distributed feature points and 3D point cloud information. This provides reference for future applications of 3D facial detection, such as medical treatment, facial recognition detection, and virtual human data input.

Key words structured light; three-dimensional reconstruction; face feature detection; near-infrared fringe

1 引言

近年来,随着科学技术的发展,人脸检测的需求也越来越多:比如安防领域,通过检测人脸的特征来确定是否为本人,以防不法分子的入侵;又如医疗行业,通过对人脸的扫描检测来实现病人脸部的整形和修复;或者在影视娱乐方面,借助扫描仪获取人脸的信息,创建出栩栩如生的虚拟人物等等。这些功能都是借助人

脸的关键信息,比如眼角距、鼻尖点、鼻翼点、两个太阳穴的间距等来实现的,一般这些参数不会随着一个人整容、换发型而发生较大的变化^[1],故可将其作为识别的特征,应用到一些识别和检测的领域里。

目前,人脸识别和检测可以大致分成两大类:一类借助二维图像,通过检测和识别二维语义特征来判断人脸位置等信息,利用深度学习和神经网络等方法提高不同场景下人脸的识别率和特征检测度,如任志玲

收稿日期: 2023-02-13; 修回日期: 2023-03-12; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 科技部重点研发计划专项(2021YFC2202400)

通信作者: *qhao@bit.com

等^[2]基于卷积神经网络来提取人脸的特征;另一类则利用不同的三维成像原理,扫描人脸的三维信息,最后重建出人脸的三维模型,目前这方面的研究主要在重建时间和精度上,即如何花费更短的时间来重建更高精度的三维人脸点云。例如:文献^[3-4]等借助扫描振镜进行红外投影来实现人脸的快速三维重建,同时也在考虑如何能更好地减弱或者消除外界因素带来的影响,以实现不同场景下对目标的三维重建,实现更好的重建结果;文献^[5-7]等利用偏振离焦的方式实现物体在过曝或曝光不足条件下的三维重建,这些都为人脸特征识别和三维重建奠定了良好的基础。

但目前人脸特征检测技术尚存在一定的问题,如二维的人脸特征检测虽能准确地检测出人脸的位置和特征信息^[8],但在空间上会丢失掉重要的深度信息,影响识别的准确率。而三维成像技术则增加了人脸的空间深度信息,使得人脸识别检测的可靠性得到了极大的提升。但三维人脸的特征识别和检测也存在一定的不足,大部分采用的是多个相机^[9]或深度学习^[10]等方式实现人脸的三维重建,满足了三维人脸的特征识别,但精度上没有达到测量的要求。而利用结构光等技术能获得较高的精度^[11],但缺少有效的特征识别及检测的方法,两种相对成熟的方法为所提方法的提出提供了现实依据。

因此,本文从二维人脸特征识别及高精度三维重建这两个方面出发,采用结构光投影三维重建与二维纹理图像人脸特征检测相结合的方法,构建了结构光三维重建与特征检测系统。结合两种方法的优势,同时避免各自的不足,实现三维人脸特征信息的提取,进

一步提高人脸特征识别的准确性和信息提取的全面性,也为后面不局限于人脸,对不同物体在三维特征方面的检测提供了一种行之有效的方法。

2 理论方法

2.1 相移法

所采用的方法为格雷码辅助四步相移法,相移法的优点在于每一点的相位值不受邻近点光照强度的影响,分辨率高,同一周期内每点的相位值绝对唯一。通过投影仪投射多幅经过编码的条纹到物体上,相邻两幅条纹相差某个固定的相移量,由相机采集经过物体高度调制过的变形条纹图,然后用相移法求解包裹相位并对相位进行解包裹,进而得到相位的分布情况。

N 步相移条纹公式如下:

$$I_n(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \times \cos\left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{N}\right], n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: $I_n(x, y)$ 为第 n 幅图像的条纹光强分布; $I_0(x, y)$ 为背景光强; $I_1(x, y)$ 为调制光强; $\varphi(x, y)$ 为相位值; N 为相移步长,取4。图1为四步相移正弦条纹图以及经过相移法计算得到的包裹相位分布。相位值求解公式如下:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \frac{2\pi n}{N}}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \frac{2\pi n}{N}}. \quad (2)$$

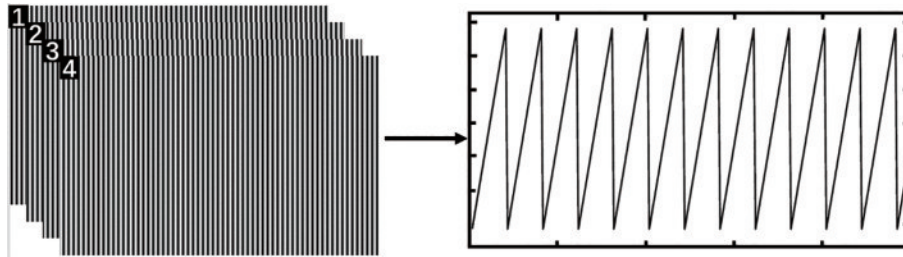


图1 相移法求解包裹相位图

Fig. 1 The phase shift method for solving the wrapped phase

但相移法求出的相位值都分布在 $(-\pi, \pi]$ 这个区间里,称之为包裹相位,这样解出来的相位在全场范围内存在歧义,因此就需要将包裹相位恢复到连续的状态,使得相位值都是唯一的,这一过程称之为相位展开或相位解包裹,恢复出来的相位称之为绝对相位或连续相位。常用的相位恢复方法有格雷码编码辅助^[12-13]和多频外差法^[14-15]等,对大场景而言,格雷码只需要增加编码的位数便能实现测量,与多频外差法相比,格雷码的优势主要体现在相位解包裹上,在求解条纹级次方面更不容易出现级次跳变的问题,格雷码只有一位跳变,属于可靠性编码,不会存在多位跳变的情况,这样提高了解码的正确率,而相移法所求解的包裹相位

值在不同周期内存在相位的二义性,使得相位值不唯一。用格雷码可以对物体表面的相位值进行周期划分,正好在格雷码图案的最小周期为相移图像周期的 N 倍条件下,能保证主相位值发生突变时条纹级次同步突变,将一点的相位值与格雷码解码的条纹级次叠加就能求得该点唯一的相位值了,因此用格雷码进行相位展开具有很高的鲁棒性。故选择格雷码辅助相移的方法来实现相位的解包裹。

2.2 互补格雷码结合相移展开相位

根据四步相移法所得到的包裹相位,可以用格雷码来辅助解包裹相位,求解得到最后的绝对相位,四步相移结合格雷码进行相位展开的原理如图2所示。

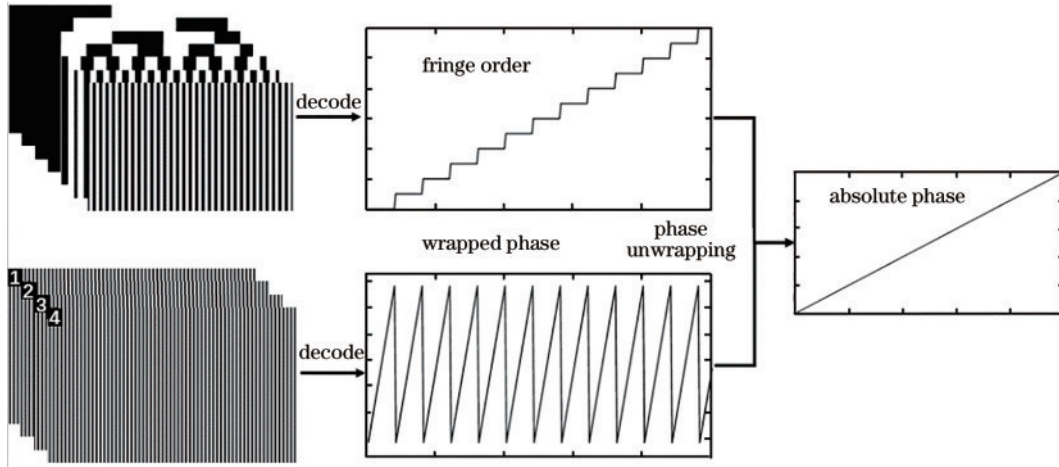


图 2 格雷码解相原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Gray code phase unwrapping

首先对四幅条纹图用四步相移法求解出包裹相位,然后通过格雷码条纹级次确定相位展开的周期,最后根据条纹级次对包裹相位进行展开得到绝对相位。对 N 位格雷码条纹进行解码求解条纹级次,将二值化后的格雷码条纹 $G_i(x, y)$ 按照由高位到低位的顺序按位异或得到二进制序列 $B_i(x, y)$:

$$B_i(x, y) = G_{i+1}(x, y) \oplus G_i(x, y), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 2. \quad (3)$$

由此完成格雷码到二进制码的转换,然后利用式(4)得到十进制条纹级次 $k(x, y)$ 。

$$k(x, y) = \sum_{i=1}^N B_i(x, y) \times 2^{N-i}. \quad (4)$$

然后将包裹相位与格雷码条纹级次相结合:

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2k(x, y)\pi. \quad (5)$$

求解出连续的绝对相位 $\phi(x, y)$ 后根据所得到的绝对相位来求解出三维点云。

2.3 三维重建

从绝对相位到人脸的三维数据,需要知道系统的结构参数,这些参数包括相机和投影仪的内参矩阵以及各自的旋转平移矩阵,想要得到这些参数就需要对结构光系统进行标定。在完成投影仪和相机的标定后,便得到了投影仪的内外参矩阵(A_p 和 M_p)和相机的内外参矩阵(A_c 和 M_c),如此便获得了投影仪的参数矩阵和相机的参数矩阵:

$$P^p = \begin{bmatrix} P_{11}^p & P_{21}^p & P_{31}^p & P_{41}^p \\ P_{12}^p & P_{22}^p & P_{32}^p & P_{42}^p \\ P_{13}^p & P_{23}^p & P_{33}^p & P_{43}^p \\ P_{14}^p & P_{24}^p & P_{34}^p & P_{44}^p \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$P^c = \begin{bmatrix} P_{11}^c & P_{21}^c & P_{31}^c & P_{41}^c \\ P_{12}^c & P_{22}^c & P_{32}^c & P_{42}^c \\ P_{13}^c & P_{23}^c & P_{33}^c & P_{43}^c \\ P_{14}^c & P_{24}^c & P_{34}^c & P_{44}^c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

这样相机坐标系上的坐标 $(u_c, v_c)^T$ 、投影仪坐标系下的横坐标 u_p 就可以通过式(8)联系起来,从而求得对应点的世界坐标 $(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 。如此,对每个点

进行相同的矩阵计算,即可获得整个待测视场范围内的三维数据,这样便能实现结构光系统的三维重建。

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^c - P_{31}^c u_c & P_{12}^c - P_{32}^c u_c & P_{13}^c - P_{33}^c u_c \\ P_{21}^c - P_{31}^c v_c & P_{22}^c - P_{32}^c v_c & P_{23}^c - P_{33}^c v_c \\ P_{11}^p - P_{31}^p u_p & P_{12}^p - P_{32}^p u_p & P_{13}^p - P_{33}^p u_p \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_c P_{34}^c - P_{14}^c \\ v_c P_{34}^c - P_{24}^c \\ u_p P_{34}^p - P_{14}^p \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.4 人脸特征检测

通过结构光系统得到人脸的三维重建数据后,检测二维人脸特征点的坐标,随后将坐标映射到三维点云上,即可完成三维人脸的特征检测。人脸特征点检测的方法大致分为三种,分别为基于主动形状模型和主动外观模型的传统方法、基于级联回归^[16]的方法以及基于深度学习的方法^[17-18]。目前人脸的关键特征数量有 68 个甚至更多,所检测的这些特征点足以满足绝大多数的人脸特征检测的场景,因此直接采用 DLIB 库来实现人脸 68 个特征点的检测,所检测到的人脸的特征点情况如图 3 所示。

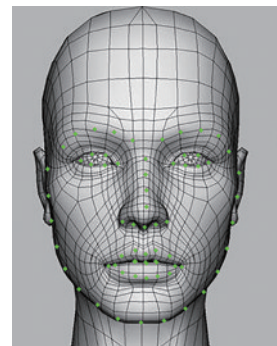


图 3 68 点人脸关键点特征图

Fig. 3 68-point face key point feature map

通过 DLIB 库对采集到的图像进行人脸的 68 个位置的特征点检测。图 4(a)为使用所构建的系统近红

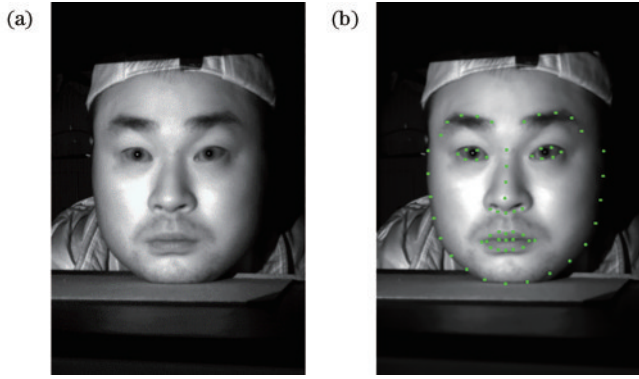


图 4 实际 68 点人脸关键点特征检测图。(a) 近红外相机拍摄的人脸图;(b)人脸特征检测图

Fig. 4 Actual 68-point face key point feature detection map. (a) Image of a face taken by a near infrared camera; (b) face feature detection map

外相机直接拍摄得到的人脸图像,图 4(b)为人的面部特征检测图,从图 4(b)可以看到,DLIB 对人脸的轮廓、眉毛、眼眶、鼻梁以及嘴唇的标注结果是十分准确的。

3 系统的构建与方案验证

所采用的硬件测量系统如图 5 所示,主要包括投影仪、工业相机及镜头、计算机等,系统的控制算法、数据处理以及分析算法是基于 C++ 语言和 Clion 平台

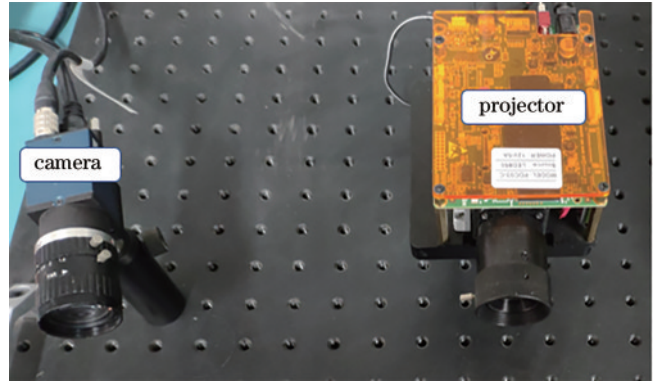


图 5 近红外结构光系统

Fig. 5 Near infrared structured light system

实现的。

投影系统采用的是巨维达 PDC03 近红外数字投影仪,投射光源波长为 850 nm,亮度为 300 lm,投射分辨率为 1280×800,像元尺寸为 0.45 inch(1 inch=2.54 cm),图像采集系统采用大恒相机 MER-232-48GM-P 近红外相机,相机的分辨率为 1920×1200,镜头焦距为 12 mm,像元尺寸为 4.8 μm,帧率为 48 frame/s。搭建系统后,首先对系统进行标定,获取系统的标定参数,所采用的标定方法为张正友标定法^[19-20],通过对圆形标定板进行投影^[21]来标定系统,最终得到系统的内外参矩阵。系统标定结果如表 1 所示。

表 1 系统标定参数

Table 1 System calibration parameter

Parameter	Camera	Digital led projector
Internal parameter matrix	$A_c = \begin{bmatrix} 2623.60 & 0 & 971.8982 \\ 0 & 2623.601 & 638.4456 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A_p = \begin{bmatrix} 2471.4216 & 0 & 689.8955 \\ 0 & 2471.4216 & 426.6369 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
External parameter matrix	$t = [-197.780296680491 \quad 8.585429627016296 \quad -12.27413703326317]^T$ $R = \begin{pmatrix} 0.09759450564185558 & 0.01035908489808213 & 0.2177703749646759 \\ -0.0110486049443111 & 0.9999370632056906 & 0.001948834616757238 \\ -0.2177364810521328 & -0.004308014351560694 & 0.9759980870019066 \end{pmatrix}$	
Population error /pixel	0.0109481	0.0459967

为了检验系统的精度,通过该系统对两个标准球进行测量,得到其三维点云分布,具体如图 6 所示。A 球直径为 50.7956 mm,B 球直径为 50.7964 mm,球心距为 100.1103 mm,此为鉴定机构的三坐标测量机给出的数据。

通过所构建的系统和方法得到标准球的三维数据,然后拟合出球面,获取标准球的半径和球心坐标,从而计算出两球之间的球心距,以评价系统的测量精度。图 7 为测量的标准球点云,图 8 为对标准球拟合出的球面。表 2 为标准球测量结果。

从表 2 可以看出,系统测量的标准球的球心距误差在 0.1 mm 以内,符合人脸的测量要求。



图 6 标准球

Fig. 6 Standard ball

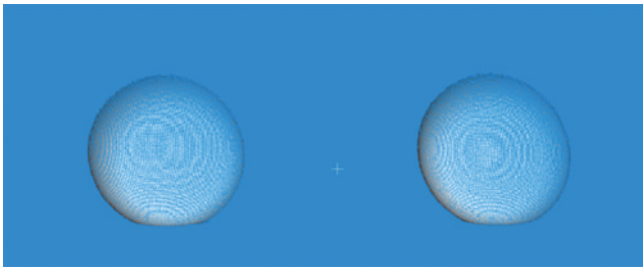


图7 标准球点云

Fig. 7 Standard ball's point clouds

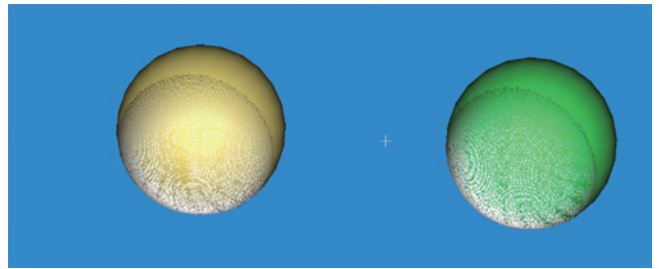


图8 标准球拟合球面

Fig. 8 Fitted sphere of standard ball

表 2 标准球测量结果

Table 2 Measurement result of standard ball

Group	Diameter of ball A /mm	Diameter of ball B /mm	Distance between spherical center /mm	Error of ball A /mm	Error of ball B /mm	Center distance error /mm
1	50.994	50.9626	100.0598	0.1984	0.1662	0.0505423
2	50.962	50.948	100.2328	0.1664	0.1516	0.1224986
3	50.9792	50.9514	100.2104	0.1836	0.155	0.1000537

图 9 为投射到人脸的相移和格雷码条纹图案，图 10 为所提方法的大致流程图。

用近红外系统重建人脸三维形貌，再通过 DLIB 库实现对二维人脸关键特征的检测，并将二维图像上

检测的人脸关键特征映射到三维人脸面上。

通过点云处理软件 CloudCompare 测得的人脸关键特征之间的距离信息如图 11 所示，所测量的数据如表 3 所示。

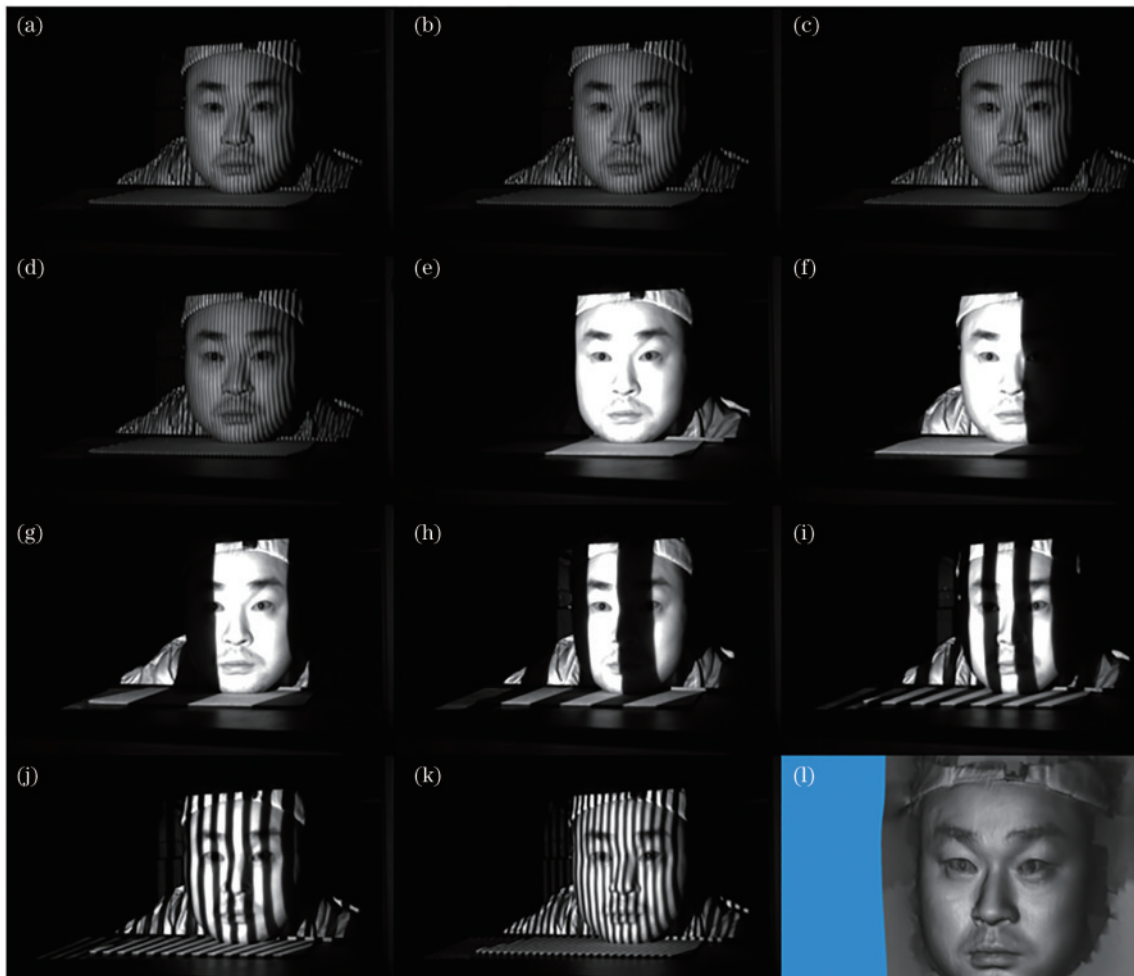


图9 投射到人脸上的条纹图

Fig. 9 Fringe pattern projected onto person's face

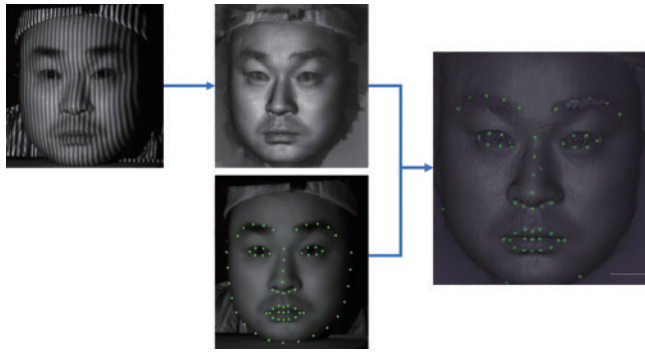


图 10 人脸特征点检测过程图及结果

Fig. 10 Measurement process and result of face feature points



图 11 人脸关键点距离

Fig. 11 Distance of face key points

表 3 人脸特征测量结果

Table 3 Measurement result of face features

Category	Distance /mm
Spacing between brows	28.223
Eyebrow tail spacing	123.367
Interorbital spacing	39.910
Extraorbital spacing	91.296
Nostril spacing	28.399
Nasal bridge spacing	44.634
Outer lip spacing	47.382

4 结 论

设计了一种结构光人脸特征检测系统,利用结构光投影技术投射格雷码和四步相移到人脸上,然后根据得到的标定参数解算出人脸的三维点云。再用DLIB对人脸特征进行检测,将二维映射到三维人脸点云实现对三维人脸特征点的检测。最后用CloudCompare得到人脸各个部位之间的位置距离信息,实现对三维人脸信息的采集、检测和获取。对系统精度的分析结果表明,所提方法是可行的,进一步促进了人脸识别的准确性和信息提取的全面性,能够有效提升人脸特征识别技术在多个领域的适应能力,为三维人脸特征检测方面的应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001. Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
- [2] 任志玲, 薛新根. 基于深度学习的人脸识别[J]. 控制工程, 2022, 29(4): 738-742. Ren Z L, Xue X G. Face recognition based on deep learning[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(4): 738-742.
- [3] Xue J P, Zhang Q C, Li C H, et al. 3D face profilometry based on galvanometer scanner with infrared fringe projection in high speed[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1458.
- [4] Guo X M, Yin W, Zuo C, et al. Fast and high-precision 3D face scanning system based on infrared fringe projection[C]//OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES), Washington, DC. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021: JTh6A.25.
- [5] Zhu Z M, You D D, Zhou F Q, et al. Rapid 3D reconstruction method based on the polarization-enhanced fringe pattern of an HDR object[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2162-2171.
- [6] Zhu Z M, Xie Y L, Cen Y G. Polarized-state-based coding strategy and phase image estimation method for robust 3D measurement[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4307-4319.
- [7] Zhu Z M, Dong Y W, You D D, et al. Accurate three-dimensional measurement based on polarization-defocused encoded structured light[J]. Measurement, 2022, 205: 112128.
- [8] 史丰畅. 基于人脸关键点与多任务学习的遮挡人脸检测算法的研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(9): 2070-2073. Shi F C. Research on occluded face detection algorithm based on face key points and multi-task learning[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(9): 2070-2073.
- [9] 林丽皇, 陈俊. 多视图三维人脸重建方法研究[J]. 电视技术, 2022, 46(7): 203-207. Lin L H, Chen J. Research on multi-view 3D face reconstruction method[J]. Video Engineering, 2022, 46(7): 203-207.
- [10] 吴梦蝶. 基于深度学习的三维人脸识别方法研究[J]. 山东工业技术, 2019(11): 156-157. Wu M D. Research on 3D face recognition method based on deep learning[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2019(11): 156-157.
- [11] 唐诗扬, 朱江平, 张建伟. 基于红外结构光的三维人脸建模[J]. 红外技术, 2022, 44(1): 28-32. Tang S Y, Zhu J P, Zhang J W. Infrared structured light for 3D face reconstruction[J]. Infrared Technology, 2022, 44(1): 28-32.
- [12] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004.

- Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004.
- [13] 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.
- [14] Wan Y Y, Cao Y P, Kofman J. High-accuracy 3D surface measurement using hybrid multi-frequency composite-pattern temporal phase unwrapping[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39165-39180.
- [15] 陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412004.
Chen S L, Zhao J B, Xia R B. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412004.
- [16] 郭克友, 贺云霞, 胡巍. 基于级联网络人脸五特征点检测及其应用[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(12): 240-244.
Guo K Y, He Y X, Hu W. Face five feature point detection based on cascade network and its application[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(12): 240-244.
- [17] 邓茜文, 冯子亮, 邱晨鹏. 基于近红外与可见光双目视觉的活体人脸检测方法[J]. *计算机应用*, 2020, 40(7): 2096-2103.
- Deng X W, Feng Z L, Qiu C P. Face liveness detection method based on near-infrared and visible binocular vision[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(7): 2096-2103.
- [18] 宋仁杰, 张广汇, 应晓霖, 等. 关键点引导相位测量的三维人脸表情获取[J]. *光学与光电技术*, 2022, 20(2): 26-31.
Song R J, Zhang G H, Ying X L, et al. Key point guided phase measurement for 3D facial expression acquisition[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2022, 20(2): 26-31.
- [19] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 2002: 666-673.
- [20] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.