



# 基于光谱匹配滤波的线结构光扫描人脸轮廓三维成像系统

李 琼

(武汉职业技术学院 电子信息工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**设计了一种基于光谱匹配滤波的线结构光扫描成像系统。系统采用近红外线结构光照明,CMOS 工业相机通过光谱匹配滤波捕捉反映人脸截面轮廓边缘的扭曲条纹,有效降低了杂散光和背景景物影响,利用局域高斯参数匹配实现了光条中心快速提取,结合一维扫描运动,实现了人脸轮廓的三维成像,并通过实际人脸轮廓扫描实验验证了系统设计的有效性。

**关键字:**三维成像;线结构光;人脸轮廓;光谱匹配滤波

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2020) 05-0112-04

物体的三维形态特征是表征物体在三维现实空间存在的重要信息,是记录、比较及复现物体形态特征的基础。近年来,随着现代信息技术的快速发展,利用光学视频采集和图像处理方法实现人脸轮廓三维建模日益成为当前三维重建领域的重要研究热点,在浸入式情景体验、增强现实/虚拟现实、游戏娱乐、数字影视、整形美容、医疗诊断、安全验证、三维显示等前沿领域具有广泛应用<sup>[1]</sup>。特别在后疫情时代,以高速有线、无线网络为基础的线上视讯会议、线上课堂互动教学、即时视频交互等人际交互方式,能够有效保持社交距离,将成为未来教育、研究、商务活动的重要方式之一。人的面部轮廓作为人际间身份认知的主要方式,可以预见其三维轮廓的获取将面临更加迫切的需求。

以光学非接触方法获取目标三维轮廓信息的三维建模技术一直是实物建模仿形、CAD /CAE、反求工程、机器视觉、工业检测、模具成形等领域研究中的热点问题,经过各国学者的多年研究,主要技术方

法集中于双目立体视觉、激光测距重建、基于人脸模型的图像分析轮廓重建、结构光重建等<sup>[2-4]</sup>。在实际应用场景中,双目立体视觉方法仿生人眼视觉重建目标轮廓,复杂背景、规则纹理或弱纹理会影响双目图像配准及重建效果<sup>[5]</sup>。激光测距重建具有量程大范围广的特点,但大场景高密度采样时间较长,对缓变目标适应较好<sup>[6]</sup>。基于人脸模型的图像分析轮廓重建通过分析二维人脸图像的特征,以深度学习的方法对通用的人脸面部三维模型进行修正实现三维重建,该方法中人脸图像获取方便,依赖深度学习过程,计算硬件成本较高,生成的三维模型数据适用于人眼观察<sup>[6]</sup>。结构光重建一般分为面结构光和线结构光两种,前者一次成像即可获取目标轮廓调制图像,采样过程简单,但面结构光生成复杂,对后期图像处理硬件要求较高;后者需要通过扫描实现对目标轮廓的采样,结构光生成较为简单,可通过调整步距控制扫描方向采样密度,采样时间较前者更长,但优于激光测距重建<sup>[7]</sup>。上述对人脸轮廓三维重建的方法各

收稿日期:2020-07-30

基金项目:2017 年湖北省教育厅科学技术研究项目“基于标准光谱的线结构光光条中心的提取方法研究”(项目编号:B2017515)。

作者简介:李琼(1979- ),女,湖北宜昌人,武汉职业技术学院电子信息工程学院副教授,研究方向:电子信息技术。

有优势,相比较而言,保持一定采样精度要求、削弱背景景物噪声影响、降低系统成本仍是目前人脸轮廓三维重建实际工程需求中需要关注的问题。

本文设计了一套基于光谱匹配滤波的线结构光扫描人脸三维轮廓成像系统。系统采用近红外激光器线生成线结构光,照明待测人脸,通过与线结构光光谱匹配的灰度 CMOS 相机捕捉扭曲光条图案,遏制复杂背景对光条图像处理的不利影响,利用高斯参数拟合提取光条中心,通过电控平移台进行线结构光一维扫描,在保持一定精度的情况下,实现了对人脸轮廓的三维成像。

### 一、人脸轮廓三维扫描系统设计

为了实现一定采样精度情况下低成本的人脸轮廓三维重建,本文选择了常见的线结构光扫描目标三维轮廓探测方法设计系统。线结构光方法也称光切法,该方法以激光直线状光斑照射待测人脸,在人脸表面轮廓上形成漫反射扭曲光条,通过固体成像器件记录扭曲光条图像,利用计算机图像处理方法提取光条中心,按照照明线光斑与成像系统中心的空间位置关系求取扭曲光条中心对应的人脸表面位置的深度信息。利用线结构光方法,每一幅图像可以获取人脸表面一个截面的轮廓边缘,配合以垂直于截面方向上的扫描运动,可以实现一定区域内的人脸轮廓三维深度信息的获取。系统构成示意图如图 1 所示。

人脸轮廓三维扫描系统由线结构光生成装置、光条捕捉装置、一维扫描运动装置、控制及数据处理装置四部分构成。

第一,线结构光生成装置:由于人的皮肤在近红外波段具有较高反射率<sup>[8]</sup>,且考虑人眼无害的激光防护等级,采用中心波长在 900nm 左右的近红外激光器作为光源,利用柱面整形光学元件构成线状光斑生成装置。

第二,光条捕捉装置:按照线结构光光源中心波长及带宽选择光谱匹配的窄带光学滤波器,降低背景景物纹理对光条中心提取的影响;并根据滤波器参数配合选择低畸变成像镜头,构建工业相机光谱匹配成像系统;窄带光谱滤波必然降低像面照度,因此,选择低照度 CMOS 工业摄像机作为成像传感器。

第三,一维扫描运动装置:光条捕捉装置获取的线结构光束照明扭曲光条图案,在结构光切面上是按照固体成像器像元等间隔采样的,因此,为了在两个方向上提取等间隔深度信息点云矩阵,需要在垂直于切面方向上进行等间隔扫描采样,这就需要通过实现均匀空间扫描,系统采用步进电机驱动精密丝杠导轨一维平移台,通过控制器驱动电机实现适当速度匀速扫描,配合调整工业相机采样频率,控制采样步距,即空间采样间隔,以保持待测人脸区域内一定的采样精度。

第四,控制及数据处理装置:用于控制扫描装置

启停,并控制工业相机接收扭曲光条图像,实现对人脸的扫描和同步的条纹图像的中心提取,数据点云生成及重建。该装置由计算机、控制及图像处理软件构成。

### 二、线结构光深度信息获取原理

系统实现人脸轮廓三维扫描成像是利用线结构光照射待测人脸从而获得人脸截面轮廓边缘的深度信息,进而通过扫描获得矩阵采样三维数据点云的。线结构光三维数据点云获取是实现人脸轮廓三维成像的基础,也就是说,从激光器发出的激光束经柱面光学元件生成截面光斑为条形的空间薄扇形光场,照射到待测人脸,其上观察到的扭曲光条图案携带了人脸轮廓的深度信息。通过光谱匹配的工业相机捕捉扭曲光条图案,通过图像处理方法提取光条中心位置,根据光切成像关系就可以计算出光条中心上每个像素对应的人脸轮廓深度信息<sup>[9]</sup>。

#### (一)线结构光光切成像

线结构光照明深度信息提取的光切成像关系示意图如图 2 所示。用于人脸轮廓扫描的线结构光是由近红外激光器产生,并经柱面元件发散的垂直于纸面的扇形光场,纸面内光束在其准直区间内发散角可以忽略,可近似为平行光束,在垂直纸面方向上能量分布服从高斯分布。以光谱匹配成像组件光学入瞳中心  $O(0,0,0)$  为坐标原点,镜头光轴为  $z$  轴,探测器光敏面长边方向为  $x$  轴, $y$  轴垂直于纸面向外,建立空间直角坐标系  $O-xyz$ 。设扇形线结构光场光学中心为  $S(x_s, y_s, z_s)$ ,扇形线结构光场照射到待测人脸表面任意点  $P(x_0, y_0, z_0)$  上,该点漫反射光波,经光谱匹配成像组件成像在工业相机固体成像器件光敏面的  $G(x_g, y_g, z_g)$  上。为了简化深度信息计算,且不失一般性,配置扇形结构光场轴线、光谱匹配成像组件轴线、 $x$  轴在同一平面上,则此时  $y_s = z_s = 0$ 。在实际应用中,待测人脸距离光条捕获装置较远,若光谱匹配成像组件焦距为  $f$ ,则  $P$  点对入瞳中心的距离  $z_0 \gg f$ ,此时  $z_g =$

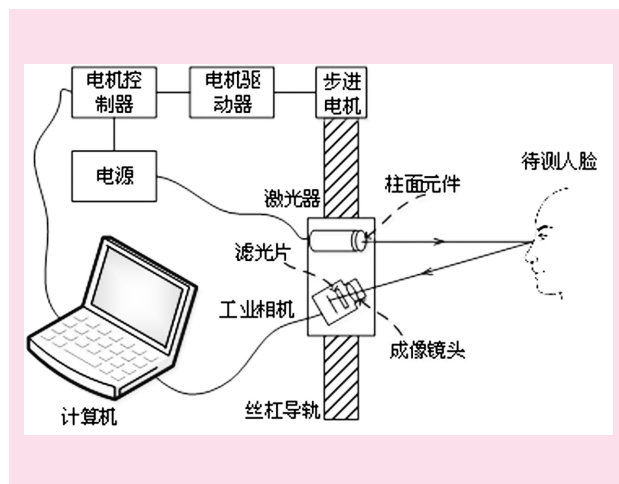


图 1 人脸轮廓三维扫描系统构成示意图

$f$ 。若照明  $P$  点的光线在  $xz$  平面和  $yz$  平面的投影与  $z$  轴夹角分别为  $\theta_x$  和  $\theta_y$ ，按照图 2 所示光切成像关系，可知：

$$\begin{cases} x_i = (x_s f + z_s f \tan \theta_x) / z_0 - f \tan \theta_x \\ y_i = f y_0 / z_0 = f \tan \theta_y \end{cases} \quad (1)$$

任意选定物空间待测人脸近平面为虚拟参考平面  $R(x_r, y_r, z_r)$ ，则像点相对于参考平面上点的偏移量为：

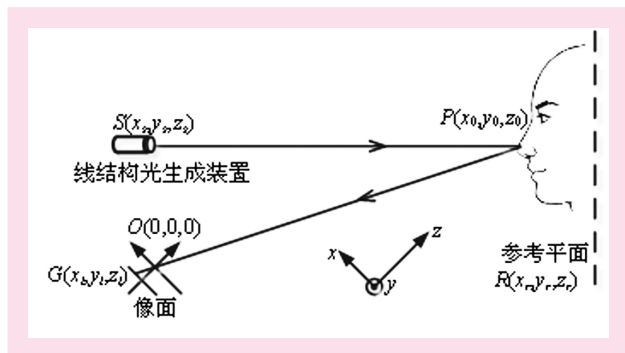


图 2 光切成像关系示意图

$$\Delta x_i = f(x_s + z_s \tan \theta_x)(1/z_0 - 1/z_r) \quad (2)$$

则  $P$  点的深度信息  $z_0$  可表示为：

$$z_0 = x_s z_r f / [x_s f + \Delta x_i z_r] \quad (3)$$

显然，在已知  $S$  位置、焦距  $f$ 、像点  $G$  的偏移的情况下，根据式 (1) 和 (3) 可求出待测人脸面上任意点  $P$  的空间坐标。

## (二) 区域高斯参数光条中心提取方法

按照上述线结构光光切成像原理，以线结构照明获取人脸表面照明切面的轮廓深度需要提取扭曲光条图像的光条中心像素坐标，才能通过光条中心偏移量计算出像素对应点的三维坐标，因此，线结构光图像中光条中心的提取是线结构光三维测量的关键环节。结构光条纹中心提取的图像处理方法一般包括光条图像滤波、光条区域分割、光条中心提取等步骤。近年来，国内外学者对这三个方面进行了大量的研究，提出了极值法、阈值法、重心法、曲线拟合法、边缘法、几何中心法等光条中心提取方法以及改进方法<sup>[10]</sup>。由于环境杂散光和背景景物的影响，这些方法通常对全幅面扭曲光条图形进行大量的图像像素邻域运算实现光条提取的，运算量大，对硬件要求较高，耗时较长。

在本文设计的人脸轮廓三维成像系统中，已通过光谱匹配滤波有效遏制了背景景物和杂散光的影响，人脸扭曲光条图的背景可以忽略，因此，在对人脸扭曲光条图像处理过程中，只需要进行简单的滤波降噪预处理遏制图像散粒噪声。由于人脸轮廓深度分布相对于参考平面而言，是在一个确定范围内

的，因此，在扫描方向上任意光切面边缘的轮廓变化范围对应确定，在光条图像背景可以忽略的情况下，仅在该区域进行中心提取可以有效降低算法的运算量。当待测人脸处于有限物距情况下，工业相机成像镜头景深有限，可方便调节待测人脸处于线结构激光弧矢面准直范围内，也就是说，在待测人脸所在的线结构激光照明范围内，光束截面每一个弧矢方向上光斑依然近似为高斯分布。光条分布参数一定空间内的不变形，生成匹配模版考虑到人脸轮廓的连续性，即便在鼻部有跳变可能，也在前述区域范围内，因此，可以通过跟踪相邻光条图像列灰度高斯分布的中心，动态移动高斯分布匹配区域，进一步提高处理速度。具体处理流程如图 3 所示。

在对人脸扭曲光条图像处理过程中，首先按照系统光路配置设定虚拟参考平面，按照人脸轮廓一般深度分布，提前预测扭曲光条可能存在区域，设为算法运行区域；并以运行区域所对应像素数目半宽

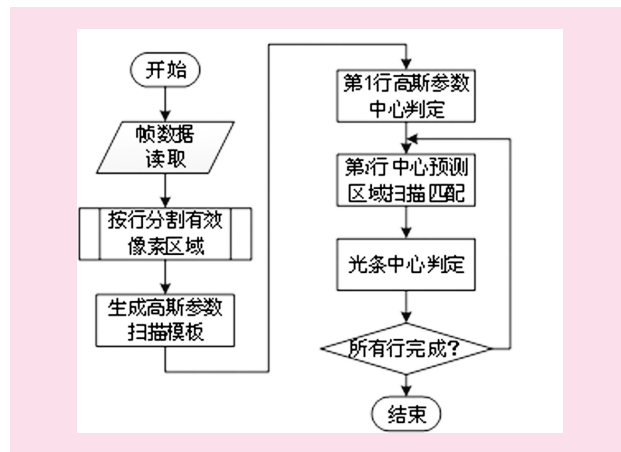


图 3 区域高斯参数光条中心提取方法框图

度作为高斯分布方差参数  $\sigma$ ，以有效区域内灰度均值作为高斯分布幅值参数  $A$ ，中心值  $x_c$  设为匹配模板中心，按照式 (4) 高斯分布生成光条中心匹配扫描模板；对每一列列中心预测位置，以光条中心匹配模板进行扫描，分析每个中心预测位置的灰度方差值，最小值即为条纹中心位置。

$$G(x_i, y_i) = A \exp[-(x_i - x_c)^2 / \sigma^2] \quad (4)$$

## 三、实验结果及分析

按照图 1 所示人脸轮廓三维扫描系统示意图，本文选择 905nm 红外激光器，结合柱面扩束元件构建线结构光生成装置，在垂直于柱面母线方向生成发散角为 60 度，截面光条光斑宽度为 2mm 的扇形线结构光照明光场；利用低畸变工业镜头、CMOS 工业相机、窄带滤光片设计了光谱匹配图像捕捉装置，连同线结构光生成装置一起安装在滑台轨道上；利用步进电机驱动 10mm 螺距的丝杠平移台，在室内



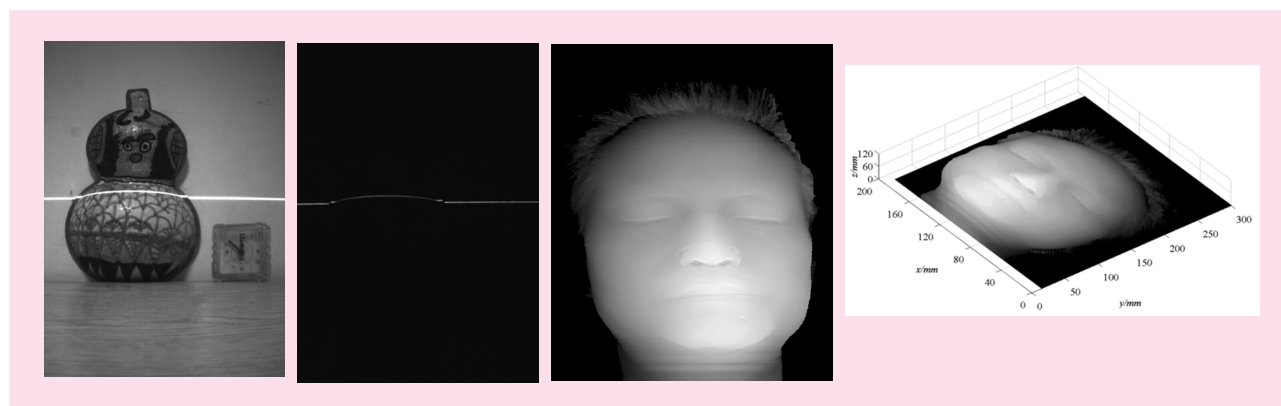
照明情况下,对真实人脸进行了扫描成像。实验结果如图4所示。

对比图4(a)和(b),可以看出,在室内采用白光LED照明的情况下,由于采用了匹配滤波获取扭曲光条图像,照明背景光和室内背景物体未在光条图像中留下痕迹,对光条中心提取影响可以忽略。从图4(c)和(d)可以看出,本文所设计的系统能够有效实现

人脸轮廓的三维成像。

#### 四、结论

本文分析了当前人脸轮廓获取的实际需求和应用场景,选择线结构光扫描方法,利用光谱匹配滤波遏制杂散光和背景景物影响,按照一般人脸深度分布预设图像处理区域,设计了一种基于光谱匹配滤波的



(a)未光谱滤波光条图 (b)光谱滤波光条图 (c)真实人脸点云灰度图 (d)真实人脸三维轮廓图

图4 真实人脸扫描成像实验结果

线结构光扫描系统,有效实现了对活体人脸轮廓的三维成像。该系统所采用方法对其他室内连续目标的三维轮廓成像同样具有重要的理论意义和实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 王珊,沈旭昆,赵沁平.三维人脸表情获取及重建技术综述[J].系统仿真学报,2018,(7):6-27.
- [2] 张举勇,武智.基于彩色和深度信息的多模态人脸识别[J].武汉大学学报:(工学版),2020,(4):353-363.
- [3] 丁少闻,张小虎,于起峰,等.非接触式三维重建测量方法综述[J].激光与光电子学进展,2017,(7):27-41.
- [4] 黄鹏程,江剑宇,杨波.双目立体视觉的研究现状及进展[J].

光学仪器,2017,(4):58-60.

- [5] 赵中民,习友宝.三维激光扫描系统的固有误差校正算法[J].激光与红外,2016,(1):34-38.
- [6] 王涵,夏时洪.单张图片自动重建带几何细节的人脸形状[J].计算机辅助设计与图形学学报,2017,(7):1256-1266.
- [7] 左超,张晓磊,胡岩.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,(3):1-45.
- [8] 唐建民,郑志军.人体皮肤和黑体[J].大学物理,1990,(1):46.
- [9] 金国藩,李景镇.激光测量学[M].北京:科学出版社,1998.
- [10] 李莹莹,张志毅,袁林.线结构光光条中心提取综述[J].激光与光电子学进展,2013,(10):9-18.

[责任编辑:刘 骋]

## Three-dimensional Imaging System Based on Spectral Matched Filtering for Line Structured Light Scanning Face Contour

LI Qiong

(Electronic Information Engineering College, Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The scanning imaging system using line structure light based on spectral matching filter is designed for more and more demand of face profile reconstruction. The system uses near-infrared structured light illumination, and the CMOS industrial camera captures the distorted fringes reflecting the edges of the face profile through spectral matching filtering, effectively reducing the influence of stray light and background scenery. The local Gaussian parameter matching is used to realize the rapid extraction of the center of the light strip, combined with the one-dimensional scanning motion, to realize the three-dimensional imaging of the face contour, and the actual face contour scanning experiment verifies the effectiveness of the system design.

**Keywords:** three-dimensional imaging; line structured light; face contour; spectral matching filter