

## 基于循环反向编码的三维人脸测量方法

盖绍彦<sup>1,2\*</sup>, 冯瑞<sup>1,2</sup>, 达飞鹏<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096;<sup>2</sup>东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

**摘要** 针对人脸测量时的抖动现象,设计了一种循环反向编码方法。该方法无需专门投影反向二值条纹辅助边缘点定位,减少了投影图案的数量。用循环的三帧条纹图像代替原本利用正反两帧条纹图像定位的方式,提高边缘点检测精度的同时能够有效消除定位偏差。实验表明,所提方法能够有效提高测量速度,同时保持较高的测量精度,减少点云中的运动波纹。

**关键词** 三维测量; 循环反向编码; 二值条纹; 边缘定位

**中图分类号** TP391 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231131

## 1 引言

近年来,基于条纹投影轮廓术(Fringe projection profilometry, FPP)的光学三维测量凭借其高精度、高鲁棒性和非接触等特点得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在测量时,计算机先生成一系列编码条纹图案,然后控制投影仪投出,之后由相机捕捉经被测物体表面调制后的条纹图案,再通过条纹的解码、解相位等算法步骤将二维图像恢复成三维物体<sup>[3-4]</sup>。

FPP中的解码方案分为空间相位展开法和时间相位展开法<sup>[5-7]</sup>。前者只需要一幅相位图就可以恢复绝对相位,但是需要依靠相邻像素的相位值,并且无法实现对不连续或孤立物体的可靠解码。后者通过投影一系列的图案并进行解码,每一个像素点对应的绝对相位值都是独立计算的,与周围像素点无关,因此理论上可以展开任意形状的物体表面。

现有的FPP设备大多使用可见光,能够满足一般场景的测量需求。近年来,人脸测量和识别成为重要研究方向<sup>[8]</sup>。人脸测量往往要求测量过程具有隐蔽性,同时不受光照的影响<sup>[9]</sup>,在红外光投影条件下的三维测量技术便应运而生<sup>[10-11]</sup>。但是,将红外光的固有特性用于三维测量会导致测量精度降低。一些学者针对如何提升红外光成像质量展开相关研究<sup>[12]</sup>,但是增强后的图像往往会破坏原本的投影图案,导致测量失败。

Song等<sup>[13]</sup>提出一种基于条纹边缘定位(Stripe

edge detection, SED)的二值条纹投影三维测量方法。使用二值条纹代替正弦条纹作为投影图案,大大增强了条纹图案的对比度。同时,对二值条纹边缘点进行检测可以减少红外成像带来的干扰。Ye等<sup>[14]</sup>将SED方法与近红外光相结合,对动态场景进行三维重建。但是SED方法本身对于解码过程中可能出现的跳变误差并没有抵抗能力。为了消除跳变误差,Feng等<sup>[15]</sup>提出了一种全局编码字校正(Global codeword correction, GCC)方法,能够恢复连续完整的点云信息。将SED结合GCC方法后,能够实现比传统相移法精度更高的三维测量。

但是在人脸测量时,由于需要投影一系列的条纹图案,在此过程中人体很难保持静止。即使抖动幅度比较小,得到的三维点云还是会产生运动波纹。受前人工作启发<sup>[16-17]</sup>,本文提出循环反向编码(Cyclic reverse coding, CRC)方法及相应的二值条纹边缘点定位方案。所提方法在不影响测量精度的前提下减少了二值条纹的投影数量,而且消除了抖动带来的定位偏差。在此基础上,以人脸特征点定位<sup>[18]</sup>辅助估计运动信息,对抖动影响后的相机坐标进行补偿。

## 2 SED方法存在的问题

SED方法投影一系列的格雷码图案和二值条纹,其中二值条纹用于提供边缘点和局部编码字。二值条纹边缘点的精确定位是实现高精度测量的关键<sup>[19]</sup>。

在图1中, $I_2$ 为第二幅正向二值条纹, $x_{\text{edge}}$ 为待求

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-08-04; 录用日期: 2023-09-04; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51475092)、江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192004C)、江苏省高校优势学科建设工程资助课题

通信作者: \*qxym@163.com; \*\*dafp@seu.edu.cn

的边缘点,  $A$  为平均光照强度。传统方法采用零穿越法<sup>[20]</sup> 直接对单幅条纹  $I_2$  检测边缘点。为了提高定位精度, SED 方法<sup>[13]</sup> 增加了  $I_2$  对应的反向二值条纹  $I_6$ 。在理想情况下,  $I_2$  和  $I_6$  的边缘点是相同的。二者相减可得边缘点  $x_{\text{edge}}$  位置, 表达式为

$$f(x)|_{x=x_{\text{edge}}} = [I_2(x) - I_6(x)]|_{x=x_{\text{edge}}} = 0, \quad (1)$$

式中:  $x$  表示图像中某一点;  $f(\cdot)$  表示根据  $I_2 - I_6$  拟合得到的曲线方程。

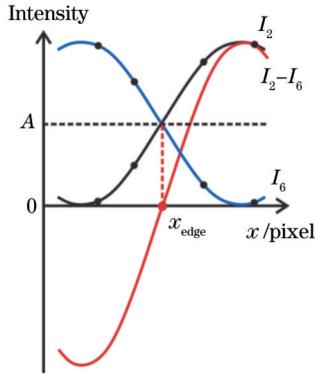


图 1 SED 边缘点检测

Fig. 1 Edge point detection of SED

当被测物体发生抖动时, 正反向二值条纹之间会出现偏移, 导致二者边缘点不再处于同一位置, 此时 SED 方法计算边缘点就会出现偏差。

如图 2 所示, 由于被测物体发生抖动, 正反向条纹发生了不同程度的偏移, 分别移动到了  $I'_2$  和  $I'_6$  的位置。  $I'_2$  与  $I'_6$  的边缘点也发生位移且不再相同, 所以按照式

(1) 得到的  $x''_{\text{edge}}$  并非真正的边缘点,  $I_2$  真正的边缘点位于  $x'_{\text{edge}}$ , 二者偏差为

$$x''_{\text{edge}} - x'_{\text{edge}} = \Delta d, \quad (2)$$

式中:  $\Delta d$  为抖动导致的边缘点定位偏差。然而, 叠加抖动导致的二值条纹序列偏移带来的运动偏差会在三维点云中产生运动波纹。

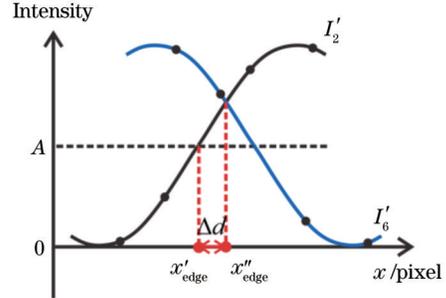


图 2 抖动对边缘点定位的影响

Fig. 2 Effect of jitter on edge point detection

### 3 CRC 方法

#### 3.1 CRC 方法

所提出的 CRC 方法所需投影条纹数量较少, 使用循环三帧条纹图像能够有效消除定位偏差。如图 3 所示, 图 3 左侧为 SED 编码方法的条纹, 需要再结合相同数量的反向条纹, 即必须额外增加 1 倍的反向条纹投影才能解出边缘点; 图 3 右侧为 CRC 方法的条纹, 当 CRC 方法的  $I_2$  与 SED 方法的  $I_2$  一致时, CRC 方法的  $I_1$  和  $I_3$  均为 SED 方法中对应条纹的反向条纹。

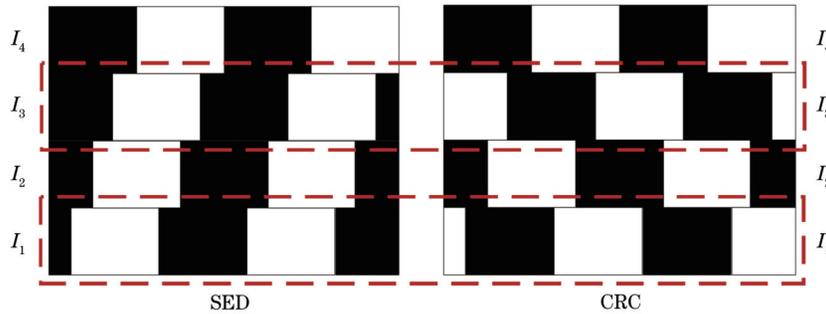


图 3 SED 编码方法与 CRC 方法对比

Fig. 3 Comparison between SED encoding method and CRC method

如上所述, CRC 方法每幅条纹的前后相邻条纹图案都对应 SED 方法的反向条纹, 结合前后相邻两幅反向条纹, 就可以精确定位中间帧条纹的边缘点。因此, 每幅二值条纹都可以循环用于其他二值条纹的边缘定位。而对于  $I_1$  和  $I_4$  的边缘点, 在  $I_1$  之前与  $I_4$  之后分别增加一幅条纹即可获取条纹边缘点准确的坐标值。因此, 不论测量时采用的条纹频率或高或低, 只需在首尾增加两幅条纹即可实现精确定位边缘点。举例来说, 当格雷码阶次的周期模糊度为 4 pixel 时, 需投影 6 幅

条纹, 而当周期模糊度为 8 pixel 时, 需投影 10 幅条纹, 比 SED 方法少投影 6 幅。

CRC 方法与条纹实际投影情况如图 4 所示。

在图 4 中,  $k_1$  为格雷码阶次,  $m$  为局部编码字, 椭圆圈出部分表示检测到的二值条纹边缘点, 虚线表示与边缘点对应的格雷码阶次。  $I_0 \sim I_5$  为循环反向投影的二值条纹, 其中,  $I_0$  和  $I_5$  为辅助定位增加的首尾条纹,  $I_1 \sim I_4$  为 CRC 方法中提供边缘点的条纹。生成条纹的表达式为

$$I_i(x) = \begin{cases} 255, & 2pt - i \times (t - 1) < x \leq 2pt + t - i \times (t - 1) \\ 0, & 2pt + t - i \times (t - 1) < x \leq 2pt + 2t - i \times (t - 1) \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $I_i(x)$  为第  $i$  幅图像  $I_i$  中某一点  $x$  处的灰度值,  $0 \leq i \leq 5$ ;  $t$  为格雷码周期模糊度, 即二值条纹的半个周期宽度;  $p$  为大于 0 的整数, 代表二值条纹的某一周期。循环反向投影的相邻二值条纹边缘点之间有一个像素的移位, 因此投影仪平面中的每个像素点编码是唯一的。

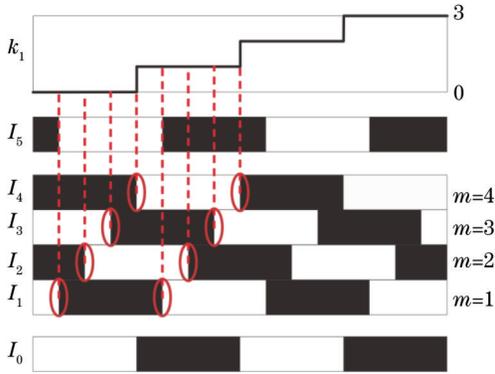


图 4 CRC 方法及实际投影情况

Fig. 4 CRC method and actual projection situation

### 3.2 CRC 边缘点定位方法

CRC 方法使用循环相邻的三帧图像求取边缘点的位置, 提高边缘点精度。

以  $I_2$  为例, 图 5 展示 CRC 边缘点定位方法。其中,  $I_1$  和  $I_3$  分别为  $I_2$  前后相邻的二值条纹。如图 5(a) 所示, 理想情况下,  $x_1, x_2$  分别为  $I_2$  与  $I_1, I_3$  的交点,  $x_{\text{edge}}$  为待求的  $I_2$  边缘点。由 CRC 方法可知,  $I_2$  的边缘点到其与  $I_1$  和  $I_3$  的交点的距离都是相等的, 所以计算交点的

中间值得到  $x_{\text{edge}}, x_{\text{edge}}$  计算表达式为

$$f_1(x)|_{x=x_1} = [I_2(x) - I_1(x)]|_{x=x_1} = 0, \quad (4)$$

$$f_2(x)|_{x=x_2} = [I_2(x) - I_3(x)]|_{x=x_2} = 0, \quad (5)$$

$$x_{\text{edge}} = (x_1 + x_2) / 2, \quad (6)$$

式中:  $f_1(\cdot), f_2(\cdot)$  分别表示根据  $(I_2 - I_1)$  和  $(I_2 - I_3)$  拟合得到的曲线方程。

如图 5(b) 所示, 当发生运动偏移时, 以  $I'_2$  为参考, 将短时间内的抖动视为匀速运动<sup>[21]</sup>, 其前后相邻的条纹  $I'_1$  和  $I'_3$  相对于  $I'_2$  分别朝相反方向运动。  $\Delta x$  为相邻两幅条纹之间的运动偏移量,  $I_1$  发生  $-\Delta x$  的偏移,  $I_3$  发生  $\Delta x$  的偏移, 这样  $I_1, I_3$  与  $I_2$  的交点  $x_1, x_2$  也随之发生相应的偏移, 偏移后到  $x'_1, x'_2$ 。因此得到

$$x_1 - x'_2 = x'_2 - x_2, \quad (7)$$

式中:  $x'_1, x'_2$  为抖动情况下实际的交点。

当有抖动干扰时, 将式(6)进行转化能够有效消除抖动带来的边缘点定位不准确的问题, 转化后得到的表达式为

$$x'_{\text{edge}} = (x'_1 + x'_2) / 2, \quad (8)$$

式中:  $x'_{\text{edge}}$  为  $I'_2$  真正的边缘点。此处为了便于论述, 以  $I'_2$  为参考并假设其没有发生运动偏移, 但是在实际情况中  $x'_{\text{edge}}$  与理想情况下的边缘点还存在运动偏差, 具体将在 3.3 小节详述。

因此, CRC 方法不需要专门投影与正向二值条纹对应的反向条纹, 仅利用相邻图像即可实现准确定位边缘点。如图 6 所示,  $I_0$  和  $I_2$  用于检测  $I_1$  的边缘点,  $I_1$  和  $I_3$  检测  $I_2$  的边缘点, 以此类推。这样不仅提高了整个投影过程的速度, 还使定位更加精确。

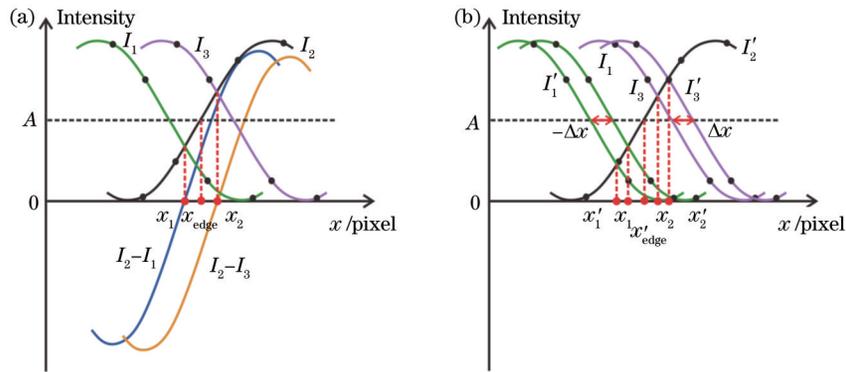


图 5 CRC 边缘点定位方法。(a)理想情况下; (b)抖动情况下

Fig. 5 Edge point detection method of CRC. (a) In ideal state; (b) in jittering state

### 3.3 利用人脸特征点补偿相机坐标

人体的抖动现象不仅会导致二值条纹边缘点的定位产生偏差, 还会使相机坐标计算出现运动偏移, 如图 7 所示。

在图 7 中,  $I_1$  和  $I'_1$  分别表示理想条纹和实际得到的

条纹, 阴影部分表示抖动引起的运动偏移,  $x_{\text{edge}}$  表示在理想情况下的二值条纹边缘位置,  $x'_{\text{edge}}, x''_{\text{edge}}$  分别表示利用 CRC、SED 方法得到的边缘位置。由图 7 可知, CRC 方法能有效消除边缘定位不准导致的偏差  $\Delta d$ 。但相邻帧之间的运动偏移并未消除, 结果依然存在  $\Delta x$

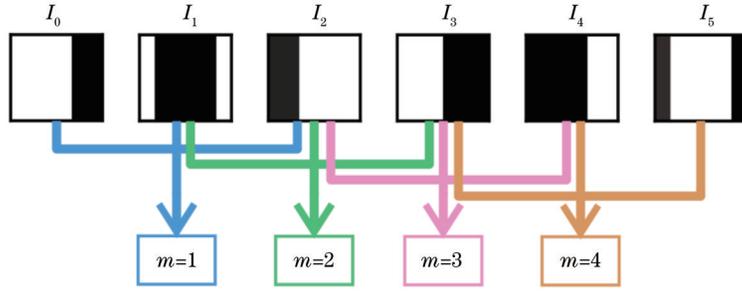


图 6 利用 CRC 方法检测边缘点

Fig. 6 Edge point detection using CRC method

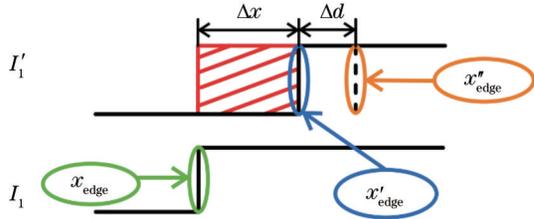


图 7 抖动造成的边缘点定位偏差及运动偏移

Fig. 7 Edge point detection error and motion deviation caused by jitter

的偏移。因此需要进一步估计运动信息,以补偿相机坐标。

在三维测量领域,人脸信息是一类非常重要的数据。东南大学的郭逸凡<sup>[22]</sup>以人脸特征点估计运动状态,进行动态三维测量。受此启发,本文利用人脸特征点估计每个点的运动信息,再将运动偏移从二值条纹边缘点中消去。具体实践中采用 Sintel<sup>[18]</sup>方法进行特征点检测,结果如图 8 所示,左图和右图分别为原图和检测结果。

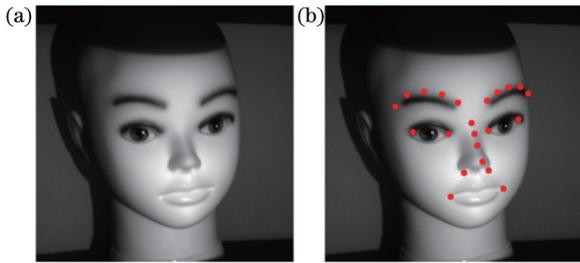


图 8 人脸特征点测量结果。(a)原始图像;(b)检测结果

Fig. 8 Results of facial landmark detection. (a) Original image; (b) detection result

测量过程需要在编码条纹前后各增加一幅白图,作为起始图像和终止图像,用于检测前后特征点的坐标差值。具体步骤如下:

1) 分别检测起始图像和终止图像的人脸特征点,计算其起始图像坐标  $(x_{j,start}, y_{j,start})$  与终止图像坐标  $(x_{j,end}, y_{j,end})$  的差值,其表达式为

$$(\Delta x_j, \Delta y_j) = (x_{j,end}, y_{j,end}) - (x_{j,start}, y_{j,start}), \quad (9)$$

式中:  $(\Delta x_j, \Delta y_j)$  表示测量期间第  $j$  个特征点在  $x$  方向和  $y$  向的位移。

2) 通过 3.2 小节的方法得到二值条纹的边缘点  $x'_{edge}$ , 将其作为  $x$  方向的相机坐标。同时,以当前边缘点所在的行数作为  $y$  方向的坐标。整合  $I'_1 \sim I'_4$  中所有条纹边缘点作为补偿前的相机坐标  $(x'_c, y'_c)$ 。

3) 计算边缘点  $x'_{edge}$  到每个特征点的距离,选取最近邻 3 个特征点计算  $x'_{edge}$  运动信息。以第  $i$  幅条纹图像为例,设边缘点补偿前坐标为  $(x'_{i,c}, y'_{i,c})$ , 其偏移量  $(\Delta x_i, \Delta y_i)$  计算公式为

$$D_j = \sqrt{(x'_{i,c} - x_{j,end})^2 + (y'_{i,c} - y_{j,end})^2}, \quad (10)$$

$$\Delta x_i = \frac{i+1}{N-1} \times \frac{\sum_{j=1}^3 D_j}{\sum_{h=1}^3 D_h} \times \Delta x_j, \quad (11)$$

$$\Delta y_i = \frac{i+1}{N-1} \times \frac{\sum_{j=1}^3 D_j}{\sum_{h=1}^3 D_h} \times \Delta y_j, \quad (12)$$

式中:  $D_j$  表示  $(x'_{i,c}, y'_{i,c})$  到第  $j$  个特征点终止图像坐标  $(x_{j,end}, y_{j,end})$  的距离;  $N$  表示由起始图像到终止图像的条纹总投影数,此处  $N=8$ 。

4) 恢复受到抖动干扰前的理想坐标值  $(x_{i,c}, y_{i,c})$ 。

$$(x_{i,c}, y_{i,c}) = (x'_{i,c}, y'_{i,c}) - (\Delta x_i, \Delta y_i). \quad (13)$$

## 4 系统实验

为了证明所提方法的可行性及有效性,搭建实验平台,建立了包含一个 DLP (Digital light possessor) 投影仪 (LightCrafter 4500) 和一部红外相机 (A5131MG7 5-NIR) 的红外光栅投影测量系统。

实验通过 7 幅格雷码图案将投影仪平面分为 114 个子区域,每个子区域的宽度为 8 pixel,以 16 pixel 为周期生成移位的二值条纹序列。SED 编码方法共需投影 16 幅二值条纹。而 CRC 方法只需要在二值条纹序列首尾各增加一幅循环反向条纹,即共投影 10 幅二值条纹。

### 4.1 静态场景对比实验

分别利用阶梯块标准件和石膏像,对 SED 与 CRC 两种方法进行对比实验。两种方法在测量时均结合文献[15]的 GCC 方法,消除编码字跳变误差。以阶梯块平面拟合均方根误差作为衡量标准,结果如表 1 所示,CRC 方法得到了更加准确的边缘点。

图 9 进一步展示了 CRC 方法的边缘点检测情况。图 9(a)为实际捕捉到的二值条纹图像  $I'_2$ ,图 9(b)为图 9(a)中实线处的二值条纹边缘点检测情况。在图 9(b)中,  $(I'_2 - I'_9)$  表示  $I'_2$  与其对应的反向条纹  $I'_9$  作差后得到的曲线(使用 CRC 方法并不需要投影  $I'_2$  的反向条纹,此处仅为了方便对比边缘点检测情况)。  $x'_1, x'_2$  分

表 1 阶梯块测量误差

Time	SED error /mm	CRC error /mm
1	0.0237	0.0226
2	0.0227	0.0197
3	0.0239	0.0236
4	0.0234	0.0231

别是  $I'_2$  与  $I'_1, I'_3$  的交点,从图 9(b)中可以看出,交点可以被准确定位,且得到的边缘点  $x'_{edge}$  刚好处于  $(I'_2 - I'_9)$  拟合曲线的零点处。这说明 CRC 方法通过相邻三帧条纹图像能够实现对二值条纹边缘点的精确定位。

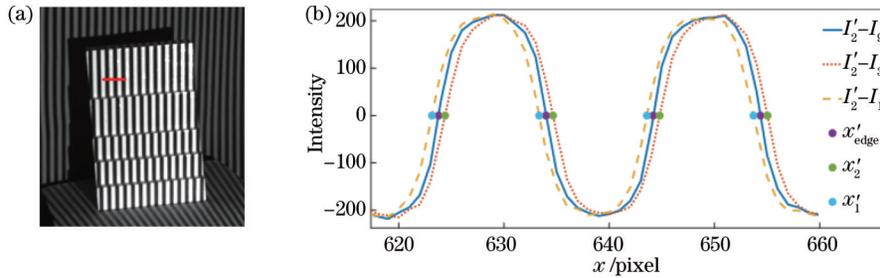


图 9 阶梯块测量结果。(a)阶梯块图像;(b)检测到的部分边缘点

Fig. 9 Results of artificial step. (a) Image of artificial step; (b) partial edge point detected

对石膏像进行测量,结果如图 10 所示。图 10 中的左图、中图、右图分别为原始石膏像图像、SED 方法得到的三维点云、CRC 方法得到的三维点云。实

验结果验证了 CRC 方法具有可行性,与 SED 方法相比,CRC 方法所需的投影条纹数量更少,投影速度更快。

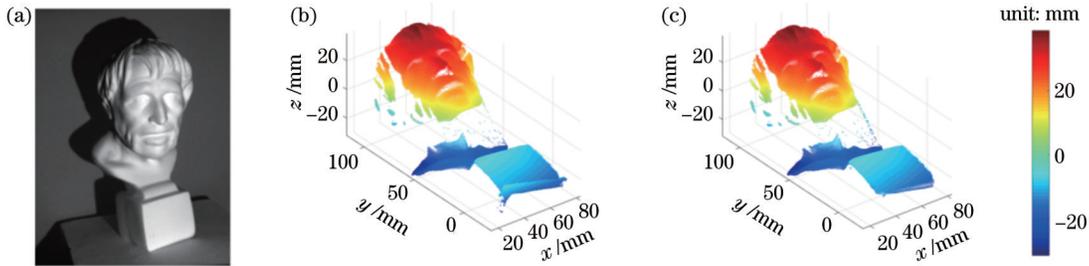


图 10 石膏像测量结果。(a)原始石膏图像;(b)SED;(c)CRC

Fig. 10 Results of gypsum image measurement. (a) Original gypsum image; (b) SED; (c) CRC

### 4.2 抖动场景对比实验

通过对人脸模型及真实人脸进行测量,利用 CRC 结合人脸特征点估计抖动信息,进一步验证方法的有效性。捕获图像时使人脸模型随机抖动,测量结果如图 11 所示。

图 11(a)为捕获到的人脸模型图像,实线处的深度信息展示在图 11(b)中。由深度信息对比可知,使用 CRC 方法有效改善了抖动带来的偏差。对比原方案与结合人脸特征点定位的方案可知,结合人脸特征点估计运动信息,能够进一步补偿不同帧之间的运动偏差。

图 12 直观表示了运动补偿对条纹边缘点计算出

的偏差,其中左图和右图分别表示每个边缘点在  $x, y$  方向上的偏移量。计算得到的是亚像素精度,为了便于显示,在图 12 中以向下取整方式为像素点赋值,因此有一些像素点显示偏移为 0。由图 12 可知,每个边缘点的偏移量是不完全相同的。以人脸特征点为辅助信息独立计算每个点的偏移量,也是所提方法的优势之一。

为了更加直观地展示抖动场景下人脸的测量结果,对三维点云进行局部渲染,结果如图 13 所示。

其中图 13(a)~(c)为抖动场景下 SED 方法得到的三维点云及局部渲染图,可以看出在人脸模型的左脸颊和右眉处存在运动波纹。图 13(d)~(f)为 CRC

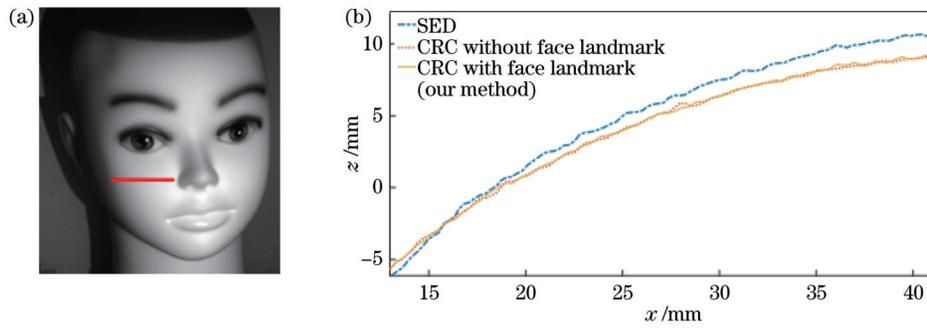


图 11 人脸模型测量结果。(a)人脸模型图像;(b)分别使用 SED、CRC 和 CRC 结合特征点得到的深度信息

Fig. 11 Measurement results of face model. (a) Image of face; (b) depth information by SED, CRC and CRC with feature points

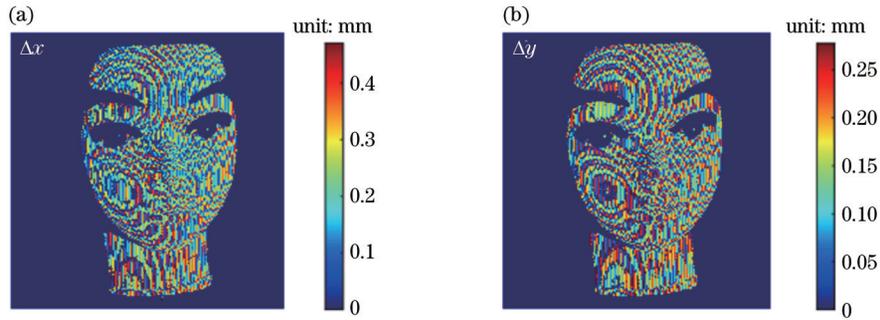


图 12 由人脸特征点得到的运动信息。(a) $x$ 方向上的偏移量;(b) $y$ 方向上的偏移量

Fig. 12 Motion information with face landmarks. (a) Offset in the  $x$ -direction; (b) offset in the  $y$ -direction

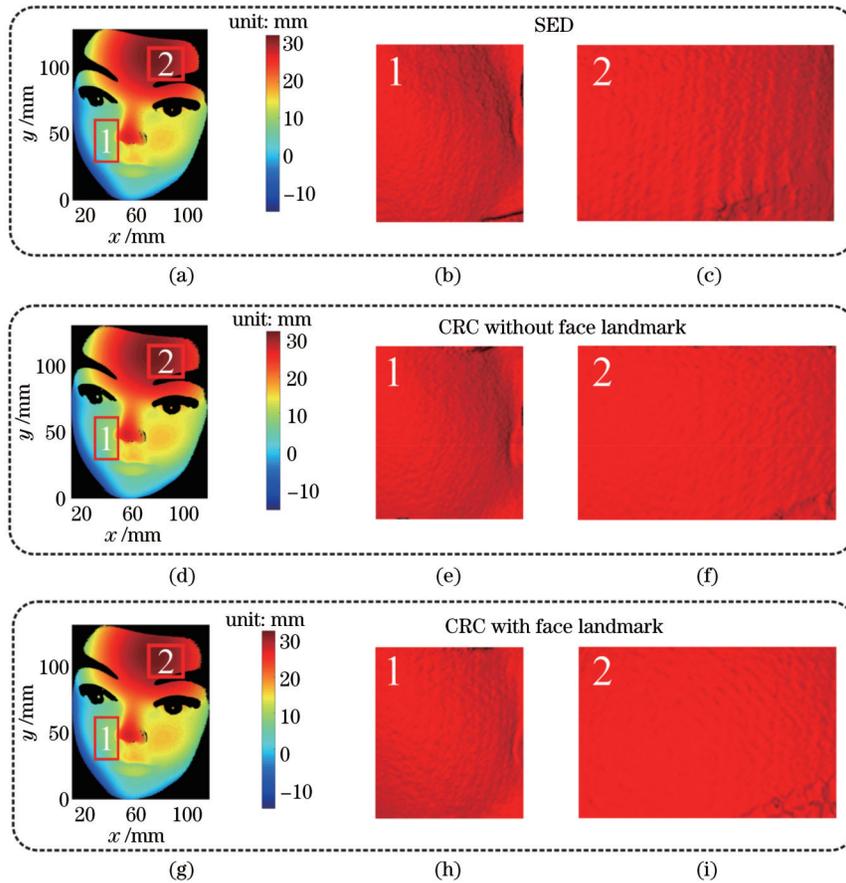


图 13 人脸模型三维点云。(a)~(c)SED;(d)~(f)CRC;(g)~(i)CRC 结合人脸特征点

Fig. 13 3D point cloud of face model. (a)~(c) SED; (d)~(f) CRC; (g)~(i) CRC combined with face landmark

方法得到的三维点云及局部渲染图,在 1 区域和 2 区域的渲染图中可以看到波纹基本被消除。图 13(g)~(i) 为所提方法得到的三维点云及局部渲染图,由图 13 (g)~(i) 可知,在补偿了相机坐标的运动偏差后,得到

的测量结果不仅减少了运动波纹,还拥有更加精细的三维细节。

以真实人脸作为测量对象,进一步验证所提方法的有效性,结果如图 14 所示。

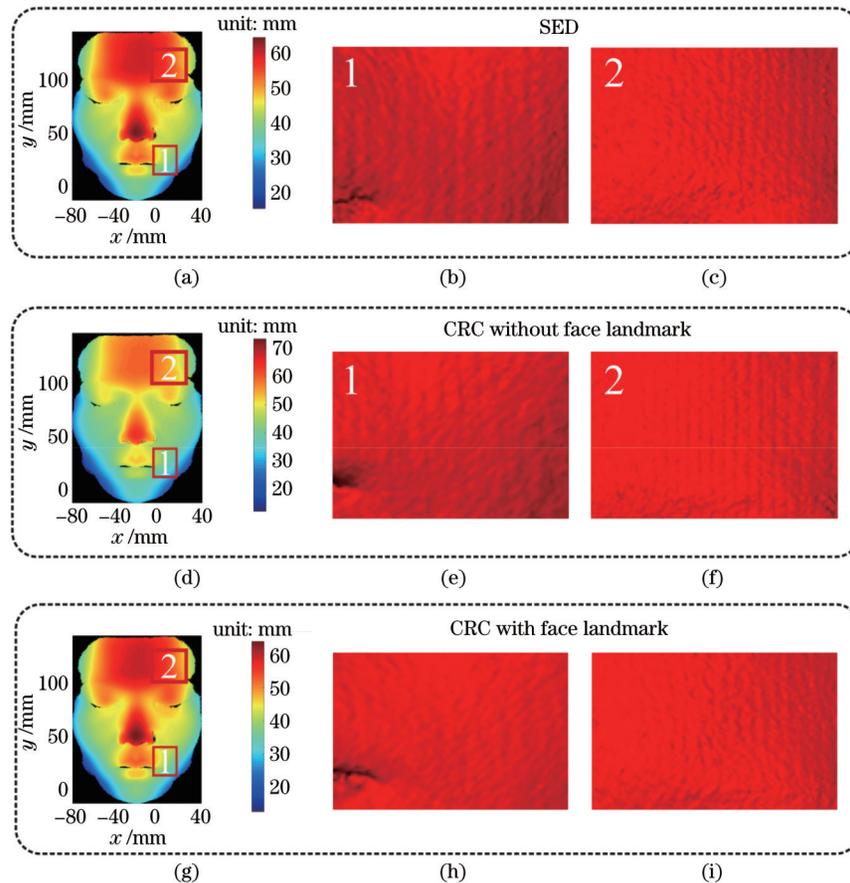


图 14 真实人脸三维点云。(a)~(c)SED;(d)~(f)CRC;(g)~(i)CRC 结合人脸特征点

Fig. 14 3D point cloud of human face. (a)~(c) SED; (d)~(f) CRC; (g)~(i) CRC with face landmark

在图 14(b)和图 14(c)中可以看到人脸的右眉和右嘴角处存在明显的波纹。使用所提方法优化后,运动误差被补偿,波纹得到改善。

## 5 结 论

提出 CRC 方法及对应的二值条纹边缘点定位方案,并利用人脸特征点估计运动信息,补偿相机坐标。所提方法不仅减少了条纹数量,还能够有效抵抗抖动造成的定位偏移。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 龙清, 李宏宁, 杨明, 等. 改进的结构光相位三维测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(24): 2410009.
- [3] Long Q, Li H N, Yang M, et al. Improved three-dimensional measurement method of structured light phase[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(24): 2410009.
- [4] Yao P C, Gai S Y, Da F P. Coding-Net: a multi-purpose neural network for Fringe Projection Profilometry[J]. Optics Communications, 2021, 489: 126887.
- [5] Zhang S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 28-37.
- [6] Zheng D L, Da F P. A novel algorithm for branch cut phase unwrapping[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(5): 609-617.
- [7] 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.
- [8] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [9] 张磊, 盖绍彦, 达飞鹏. 基于真实人脸类别对抗机制的人脸活体检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(10): 1010007.
- [10] Zhang L, Gai S Y, Da F P. Face detection algorithm based on real face category confrontation mechanism[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(10): 1010007.
- [11] 王国琛, 吴二星, 王立平. 一种基于 PSFS 的近红外人脸 3D 形貌重构系统[J]. 电视技术, 2018, 42(8): 36-41.
- [12] Wang G H, Wu E X, Wang L P. A near infrared system of 3D facial shape recovery based on PSFS[J]. Video Engineering, 2018, 42(8): 36-41.

- [10] Chang C X, Zhang Z H, Gao N, et al. Improved infrared phase measuring deflectometry method for the measurement of discontinuous specular objects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106194.
- [11] 魏永超, 苏显渝. 红外结构光人脸三维面形测量[J]. *激光与红外*, 2006, 36(8): 696-698.  
Wei Y C, Su X Y. Infrared structure light face 3D-shape measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 696-698.
- [12] Dulski R, Powalisz P, Kastek M, et al. Enhancing image quality produced by IR cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7834: 783415.
- [13] Song Z, Chung R, Zhang X T. An accurate and robust stripe-edge-based structured light means for shiny surface micromasurement in 3-D[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 1023-1032.
- [14] Ye Y P, Chang H G, Song Z, et al. Accurate infrared structured light sensing system for dynamic 3D acquisition[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(17): E80-E88.
- [15] Feng R, Gai S Y, Da F P. Three-dimensional face measurement based on stripe edge detection using infrared light [J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(9): 094103.
- [16] Lu L, Xi J T, Yu Y G, et al. Improving the accuracy performance of phase-shifting profilometry for the measurement of objects in motion[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6715-6718.
- [17] Lu L, Ding Y, Luan Y S, et al. Automated approach for the surface profile measurement of moving objects based on PSP[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 32120-32131.
- [18] Sindel A, Maier A, Christlein V. ArtFacePoints: high-resolution facial landmark detection in paintings and prints[M]// Karlinsky L, Michaeli T, Nishino K. *Computer vision - ECCV 2022 workshops*. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2023, 13801: 298-313.
- [19] Song T, Tang B P, Zhao M H, et al. An accurate 3-D face location method based on sub-pixel edge detection and non-parametric stereo matching[J]. *Measurement*, 2014, 50: 160-171.
- [20] Zhang C W, Zhao H, Gao X, et al. Phase unwrapping error correction based on phase edge detection and classification[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106389.
- [21] Lu L, Suresh V, Zheng Y, et al. Motion induced error reduction methods for phase shifting profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106573.
- [22] 郭逸凡. 运动物体散焦光栅投影三维测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 43-44.  
Guo Y F. Research on 3D measurement technology of defocused grating projection for moving objects[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 43-44.

## 3D Face Measurement Based on Cyclic Reverse Coding

Gai Shaoyan<sup>1,2\*</sup>, Feng Rui<sup>1,2</sup>, Da Feipeng<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** Fringe projection profilometry has been widely used due to its high accuracy, high robustness, and non-contact characteristics. In this paper, we aim to improve the speed and accuracy of the fringe projection profilometry method, especially its performance in jittery environments. In-depth research is conducted. Typical optical 3D sensing technologies mainly include photometric stereo vision, binocular multi-eye stereo vision, time of flight method, laser line scanning method, defocus shape recovery method, and structured light projection method. Structured light projection also includes stripe projection and speckle projection methods. The decoding schemes in fringe projection profilometry are divided into the spatial phase unwrapping method and the temporal phase unwrapping method. The former only requires one phase map to recover the absolute phase, but it relies on the phase values of adjacent pixels, which cannot achieve reliable decoding for discontinuous or isolated objects. The latter projects a series of patterns for decoding, and the absolute phase value corresponding to each pixel is independently calculated, independent of the surrounding pixels. Therefore, theoretically, any shape of the object surface can be unfolded. In the binary fringe method, in order to enhance the contrast of the stripe pattern, binary fringes are used instead of projecting sinusoidal fringes. However, traditional methods require more stripes. For example, the classic method of stripe edge detection requires adding reverse stripes to achieve accurate stripe decoding and positioning. The goal of this paper is not only to reduce the number of stripes but also to effectively improve the accuracy of localization.

**Methods** Edge localization of binary fringes is a key issue. Song et al. proposed a three-dimensional measurement method based on stripe edge detection. The use of binary stripes instead of sinusoidal stripes as projection patterns greatly enhances the contrast of stripe patterns. At the same time, edge points of binary fringes are detected to reduce interference caused by infrared imaging. Ye et al. combined the stripe edge detection method with near-infrared light to perform a three-dimensional reconstruction of dynamic scenes. However, the stripe edge detection method itself has no resistance to potential jump errors that may occur during the decoding process. To eliminate jump errors, Feng et al. proposed a global

codeword correction method that restores continuous and complete point cloud information. By combining stripe edge detection with the global codeword correction method, it is possible to achieve 3D measurements with higher accuracy than traditional phase shift methods. When the measured object experiences shaking, there will be a deviation between the forward and reverse binary fringes, causing the edge points of the two to no longer be in the same position. The stripe edge detection method will calculate the edge points, resulting in a deviation. By taking the periodic ambiguity of gray code order as an example, which is four pixels, the stripe edge detection encoding scheme requires the same number of reverse stripes to be combined. In other words, an additional double of the corresponding reverse stripe projection must be added to solve for edge points. Further, jitter often causes positioning deviation, which leads to errors. That is an important source of error. The performance in a jitter environment will be improved by using a new method in this article. The proposed method does not require specialized projection of reverse stripes corresponding to forward binary stripes and can achieve accurate edge point localization using adjacent images.

**Results and Discussions** The method proposed in this article can effectively eliminate the problem of inaccurate edge point positioning caused by jitter. Furthermore, the effectiveness and accuracy of the method are validated through measurement experiments in jitter scenarios. In the new scheme, only one cyclic reverse stripe pattern needs to be added at the beginning and end of the binary stripe sequence. In the method proposed in this article, the reverse stripe corresponding to the forward binary stripe is not necessary. In addition, achieving accurate edge point positioning is based on adjacent images to obtain the final accurate information. The traditional stripe edge detection method can cause offset in the forward and reverse binary fringes in jitter scenarios, resulting in errors. The new method accurately corrects errors and achieves good results. The experimental results demonstrate that the new method achieves precise positioning of binary stripe edge points through adjacent three frame stripe images. The measurement object is used as the standard to measure the quality of the measurement results. The results are shown in Table 1. The proposed new scheme reduces the number of stripes and uses three adjacent cyclic reverse stripes to locate edges, resulting in more accurate edge points.

**Conclusions** In terms of edge localization of binary fringes, this method not only reduces the number of fringes but also effectively resists positioning offset caused by jitter. Compared with the traditional stripe edge detection encoding scheme, in the traditional scheme, a reverse stripe with the same number of stripes as the original encoding is required to obtain the encoding result. The method proposed in this article can achieve more accurate results with fewer stripes, which is significantly superior to traditional methods.

**Key words** 3D measurement; cyclic reverse coding; binary fringe; edge detection