

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.006

基于斑点位置编码的多线结构光三维测量系统

陈存存¹, 李小庆¹, 徐玉华²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 奥比中光研究院, 广东 深圳 518000)

摘要:针对多线结构光三维测量系统多线编号识别问题, 文章提出一种新的合成编码方式, 即投射一张编码斑点图和一张多线图, 利用斑点分布对多线编、解码, 实现多线编号识别。通过 Unreal Engine 4 仿真单目线结构光系统, 验证该方法可行。利用投影仪和相机搭建基于斑点位置编码的多线结构光实物三维测量系统, 进行实验, 结果表明该系统在距离 40 cm 左右、不依靠对物体贴标志点即可完成对物体的三维测量, 精度达 0.154 2 mm。

关键词:线结构光; 合成编码; Unreal Engine 4; 三维测量

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)08-1045-07

Multi-line structured light 3D measurement system based on spot position coding

CHEN Cuncun¹, LI Xiaoqing¹, XU Yuhua²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Orbbec Research, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Aiming at the problem of multi-line number recognition in multi-line structured light three-dimensional(3D) measurement system, a new synthetic coding method is proposed. A coded spot map and a multi-line map are projected, and the spot distribution is used to encode and decode the multi-line to realize multi-line number recognition. The feasibility of this method is verified by simulating a monocular line structured light system through Unreal Engine 4. Then, a real 3D measurement system is built using a projector and a camera for experiments. The results show that at a distance of about 40 cm, the 3D measurement of the object is completed without relying on the marker points on the object, with an accuracy of 0.154 2 mm.

Key words: line structured light; synthetic coding; Unreal Engine 4; three-dimensional(3D) measurement

随着科技的进步和工业的发展, 三维测量技术在逆向工程^[1]、工件质检^[2]和质量控制^[3]等方面的需求越来越多。三维测量技术主要分为接触式测量和非接触式测量^[4]两大类。在非接触测量中, 结构光测量方法因简单、稳定、精度高等优点被广泛应用。结构光包括点结构光^[5]、线结构光和面结构光^[6]等。对于线结构光, 现有的激光测量方法主要分为单线和多线。单线结构光系统原理简单、易实现, 但由于只有一条激光线, 测量范

围有限、效率低, 且需要粘贴标志点完成点云拼接; 多线结构光系统可一次重建多条激光线的三维信息, 效率更高, 但线的数量增多后需要对多线进行编号。文献[7]将双目立体视觉与多线结构光结合, 利用双目立体视觉的匹配算法解决多线结构光的光平面匹配问题, 从而识别线的编号完成三维物体的测量, 但需要多引入一台相机, 造成成本提高; 文献[8]通过投射格雷码加合成编码实现对多线结构光进行编码、解码, 但需要投射多张

收稿日期: 2023-06-26; 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61703060; 61802036; 12061088)

作者简介: 陈存存(2000—), 男, 安徽蒙城人, 合肥工业大学硕士生;

李小庆(1990—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 合肥工业大学讲师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: lxiaoqing2016@126.com.

图片测量,效率较低;文献[9]采用颜色编码激光条纹的方案,使用彩色相机获取彩色图像,依据不同颜色编码区分线的编号,但该方法易受物体表面颜色的影响。多线结构光也可以采用较少的激光线来区分,如在工业扫描中使用 7×2 条激光线,但是需要粘贴标志点辅助完成点云重建。

本文主要工作如下:① 针对多线编号识别问题,提出一种编码方式,向被测物体投射多线图案和编码图案,利用编码图案对多线图像解码,实现多根线编号的识别;② 基于三角测量原理对识别的多根线计算点云,通过拍摄多帧图片并利用投影最近点迭代法(iterative closest point, ICP)重建三维物体,完成物体点云的拼接,且不需要添加标志点或者多台相机,降低了成本。

1 三维空间坐标计算

当线结构光发射器发射一条光条打到被测物体上,深度不一的表面将引起光条形变,用相机拍摄带有光条图案的被测物体图像,基于该图像计算光条的三维坐标。

1.1 光平面

根据线结构光扫描原理,每根光条都对应一个光平面方程^[10]。相机的光心和图像中光条上的某一点可以确定一条射线,由这条射线与光平面方程的交点确定被扫描对象点的三维坐标。设 P 表示三维空间中光条上的某一个三维坐标点, p 表示点 P 在相机拍摄图像上对应的成像点,连接点 p 与相机光心,则点 P 在这条连线的延长线上。由于线结构光发射器发射的光条可以拟合为一个光平面,由直线与光平面的交点即可以计算出点 P 。设在相机坐标系下的光平面方程为:

$$AX_c + BY_c + CZ_c + D = 0 \quad (1)$$

其中: A 、 B 、 C 、 D 为在相机坐标系下光平面方程的参数; (X_c, Y_c, Z_c) 为相机坐标系下光平面内任意一点坐标。若已知像素坐标系下任意一条光条中心点的坐标 (u, v) ,则可以计算相机坐标系下的坐标 (X_c, Y_c, Z_c) ,但在转换过程中易深度丢失,因此转换到归一化平面中,得到坐标 $(x_c, y_c, 1)$,对应关系为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \frac{-D}{Ax_c + By_c + C} \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{K} 为相机内参矩阵。联立式(1)、(2)、(3)即可求出该点的三维坐标。

1.2 对极几何

投影仪的工作原理是将待投影图像烧录至投影仪中,投影仪会发射光线将图片进行投影,这种成像模式可以将投影仪视作相机的逆过程设备。对被测量物体进行测量,当光条投射到被测量物体表面,在三维空间坐标系下,光条中心线上任意一点必然在相机拍摄的图像与投影图片对应的条纹中心上。假设 P 点在相机坐标系下的三维坐标为 $[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$,归一化坐标为 $[x_c \ y_c \ 1]^T$,成像点的像素坐标为 $[u_c \ v_c]^T$,则在投影仪坐标系下的三维坐标为归一化坐标 $[X_p \ Y_p \ Z_p]^T$,成像点像素坐标为 $[u_p \ v_p]^T$ 。由对应关系可知:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \mathbf{K}_c \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K}_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_p} \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: \mathbf{K}_c 、 \mathbf{K}_p 分别为相机内参矩阵和投影仪内参矩阵; R_{mm} 为旋转矩阵的自由度参数; t_i ($i=x, y, z$) 为平移向量的自由度参数;旋转矩阵和平移向量表示相机坐标系与投影坐标系之间的转换关系。由于多线投影图片上 x 轴方向的横坐标 x_p 已知,联立式(5)、(6)求出三维坐标,即

$$Z_c = \frac{t_x - t_z x_p}{Ax_p - B},$$

$$A = R_{31} x_c + R_{32} y_c + R_{33},$$

$$B = R_{11} x_c + R_{12} y_c + R_{13} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 多线编码和解码

2.1 线的编码基本原理

当发射端投影模块的 x 轴(即水平方向)与相机光心和投影中心的连线平行,依据简单几何原理,可得:

$$\left. \begin{array}{l} O_p O_c \parallel a \\ O_p O_c \parallel c \end{array} \right\} \Rightarrow a \parallel c \quad (7)$$

其中: O_p 、 O_c 分别表示投影仪的光心和相机的光心; a 为投影图像上与 x 轴平行的任意一条直线; c 为该直线在相机接收参考平面成的像。原本处于同一水平线上的编码斑点,在接收端的相机图像中依然处于同一条水平线上,因此在接收端生成的编码图像中的斑点上下位置关系保持不变。基于这一特性,利用斑点上下位置的关系对获取的多线图案进行解码处理。

具体而言,当发射端投射垂直方向分布的多线图案时,这些线段相互平行,利用斑点图案即可对多线图案进行唯一性编码。

多线未编码图案如图 1 所示。图 1 中,多线图案包含的每根激光线(竖直的实线)所在位置投射至少一个斑点,使所有斑点分布于同一条水平线上,但这样分布的斑点无法实现对激光线进行有效编码。

对图 1 中斑点投射的位置实施微小的上下偏移调整,将部分位置的斑点向上移动一个固定的偏移量,或者将另一部分位置的斑点向下移动一个固定的偏移量,使得这些斑点处于不同水平线上,如图 2 所示。这样每个斑点在垂直方向上有 3 种状态,分别记为高(H)、中(M)、低(L),若利用每根激光线附近在水平方向上的至少 3 个斑点,则能够实现对当前激光线的编码。例如:第 1 根激光线的编码为 MHH;第 2 根激光线的编码为 HHM;第 3 根激光线的编码为 HMM。基于这样的编码规则,理论上可以实现 27 种不同的编码方式,即至少可以实现 27 根激光线的唯一性编码。图 2 所示的斑点编码图案为在发射端中的图案。

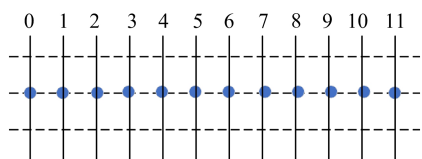


图 1 多线未编码图案

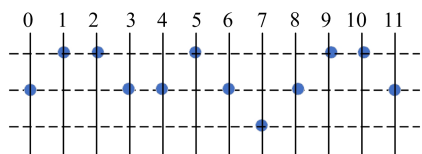


图 2 27 线编码图案

当编码图案的排列组合在激光线附近时,即在相邻 2 根激光线之间放置 2 个斑点,这样每根激光线在水平方向上有 4 个斑点对当前激光线进

行编码,如图 3 所示。例如:第 1 根激光线的编号为 HHHM;第 2 根激光线的编号为 HMHH;第 3 根激光线编号为 HHMH。通过这种编码方式,实现对 81 根激光线的唯一编码。

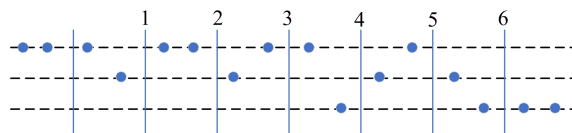


图 3 81 线编码图案

2.2 行对齐校正

本文提出的三维重建系统要求相机光轴与投影仪光轴平行且处于同一高度,然而这种配置下,相机无法拍摄到投影仪投射的完整图案,产生拍摄盲区。为缩小相机拍摄盲区,将相机偏移一定角度,但这会导致原本处于同一条水平线上的斑点发生错位。为使斑点依旧保持在同一条水平线上,对图片进行行对齐校正。在校正图片的过程中,若使用原有的相机内参进行重投影,则图像会出现黑边,存在信息丢失的情况,为了避免这种情况,需要重新更新相机内参,改变成像面。保持图像宽度不变,以最大图像宽度为准,使得重新校正后的图像必定经过图像左、右两侧的点。利用该约束条件计算更新后的 K' ,根据下式完成图像校正,即

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = K'^{-1}RK \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: (u, v) 为校正前图像中任意一点坐标; (u', v') 为校正后的图像坐标; K 为相机内参矩阵; R 为相机到投影仪之间的旋转矩阵。

2.3 光条中心提取

相机拍摄带有光条的图案,需要提取光条中心。目前条纹中心提取方法包括极值法、几何中心法、边缘法等,然而这些方法难以达到亚像素级水平。为提高三维重建的精度,本文采用 Steger 算法^[11]提取光条中心。Steger 算法利用海森矩阵对条纹中心任意一点计算特征值和特征向量,确定光条的法线方向,然后在光条法线方向上将灰度分布按照泰勒多项式展开。根据数学原理,当展开式的一阶导数为 0 且二阶导数为负时,该点是条纹截面中心的亚像素点。因此对于图像中光条上的任意一点 (u, v) ,海森矩阵为:

$$H_{(u,v)} = \begin{bmatrix} I_{uu} & I_{uw} \\ I_{uw} & I_{ww} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: u 、 v 分别为像素的行坐标和列坐标; I_{uu} 表示图像沿着 u 的二阶偏导数; I_{uv} 表示图像沿着 u 、 v 的二阶偏导数; I_{vv} 表示图像沿着 v 的二阶偏导数。设 (n_u, n_v) 是海森矩阵求出的最大特征值对应的特征向量,以点 (u_0, v_0) 为基准点,则光条中心的亚像素坐标为:

$$(p_u, p_v) = (u_0 + tn_u, v_0 + tn_v) \quad (10)$$

其中, $t = \frac{n_u I_{uu} + n_v I_{vv}}{n_u^2 I_{uu} + 2n_u n_v I_{uv} + n_v^2 I_{vv}}$ 。且该点 (tn_u, tn_v) 满足 $tn_u \in [-0.5, 0.5]$, $tn_v \in [-0.5, 0.5]$, 此时 (u_0, v_0) 为光条的中心点, (p_u, p_v) 为亚像素坐标。

2.4 斑点中心提取

投影仪将编码的斑点图像投射到被测物体上,因受到物体高度的调制,斑点会发生变形。由于编码位置处于较小区域,且相邻斑点间高度偏移微小,相机拍摄的编码斑点图中相邻斑点高度难以分辨,需要识别斑点中心确定高低分布。根据斑点的明暗分布,即中心最亮、往四周慢慢变暗,类似于二维高斯模型^[12],提取斑点中心的步骤如下所述。

1) 计算图像像素点 (x, y) 周围所有像素的平均灰度值 $m(x, y)$,即

$$m(x, y) = \frac{1}{w^2} \sum_{\substack{-k \leq i \leq k \\ -k \leq j \leq k}} f(x+i, y+j) \quad (11)$$

其中: w 为像素均值局部邻域窗口宽度,一般取奇数; $k = (w-1)/2$ 。

2) 将平均灰度值 $m(x, y)$ 作为局部阈值,对窗口每个像素点通过下式进行阈值分割,得到斑点区域 S ,即

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq m(x, y); \\ f(x, y), & f(x, y) > m(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

3) 对斑点区域 S 做高斯滤波,并保留浮点数,记为 S_f 。

4) 在斑点区域 S_f 内逐一对每个像素的强度与其8个邻域的所有像素强度进行比较,若某像素强度大于其8个邻域所有像素强度,则将该像素视为斑点区域的中心。

2.5 线的解码

将提取的多线图与斑点图合并形成点线图。基于上文所述线的编码、解码原理,利用线寻找每侧的2个斑点,识别斑点的高、中、低状态,进而确定每条线的唯一编号。解码线的步骤如下:

1) 根据斑点分布识别并标记斑点的高、中、

低状态,划分解码区域 $\{D_1, \dots, D_n\}$ 。

2) 在解码区域内,为任意一条线寻找两侧各2个斑点,获得该线码值 C 。

3) 依据设计的编码表,将码值 C 转换为对应线编号 L ,实现线的解码。

4) 若部分线因编码丢失导致解码区域无法解码,则可借助左线的编号 L_l 和右线的编号 L_r 更新线的码值。具体来说,当 L_l 存在 L_r 不存在时, $L = L_l + 1$;当 L_l 不存在 L_r 存在时, $L = L_r - 1$;当 L_l, L_r 都存在时,若 $L_l - L_r = 2$,则 $L = \frac{(L_l + L_r)}{2}$,否则不更新线的码值。

通过线的解码可以确定每条线对应的位置及其唯一编号,利用光平面或对极几何原理求解出每条线在三维空间中的坐标,最终生成点云。

2.6 点云拼接

解码所得点云图由深度不一的线组成,由于是线结构光,2帧间重复点较少,对应点对难以寻找。为了解决这个问题,将三维点云映射到二维图像,其横坐标为线编号,纵坐标为点云纵坐标,实现点云中每个点在二维图像中都有对应坐标。投影ICP配准^[13-14]算法流程如下:

1) 得到的2帧点云数据分别记作源点云 P 和目标点云 Q ,并将点云映射到二维图像 M_p, M_q 上。

2) 对源点云 P 中每个点 p_i 找到 M_p 中对应的坐标 (x, y) ,然后在目标点云的二维图像 M_q 中相同位置找到 q_i, q_i 为 p_i 的对应点,形成对应点对 (p_i, q_i) 。

3) 求取点对 (p_i, q_i) 的余弦向量绝对值 ϵ ,如果 ϵ 小于0.1,那么保留点对。

4) 根据筛选后的点对通过下式求解旋转平移矩阵,并计算此时对应点对的距离平方和 d_k ,即

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=0}^N [(\mathbf{R}p_i + \mathbf{t} - q_i)^T \mathbf{n}_i]^2 \quad (13)$$

5) 求解出旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} ,通过下式更新源点云 P 为 P' ,即

$$p_i' = \mathbf{R}p_i + \mathbf{t} \quad (14)$$

6) 将点云 P' 取代点云 P 重复以上步骤,当相邻2次迭代 $|d_k - d_{k-1}|$ 小于预先设定的阈值 d 或迭代次数 g ,停止迭代。

2.7 点云滤波

点云拼接后的图像由于线解码难免出现错误,拼接后的点云融合图像存在较多的点云噪声。

根据噪声点与目标实体点云的位置关系以及对目标实体表面细节的影响,可分为大尺度噪声点和小尺度噪声点^[15]。大尺度噪声点通常远离目标物体,孤立分布在目标点云周围;而小尺度噪声点则混杂在目标点云中,距测量物体近但不属于目标点云,难以准确识别。

为了获得平滑的多帧融合点云,提出以下优化步骤:

1) 根据相机与被测物体的距离,设置 Z 坐标阈值,对目标点云进行过滤。

2) 对目标点云采用半径滤波^[16],进一步过滤大尺度噪声点。

3) 大尺度噪声点大幅减少之后再对点云下采样,采用双边滤波^[17],使得点云更加平滑。

通过以上步骤,完成点云的处理和优化,从而获得高质量的多帧融合点云。

3 实验及结果分析

3.1 仿真实验

为了验证所提出方法的有效性,本文使用 Unreal Engine 4 仿真分辨率大小为 $1\ 280 \times 800$ 的投影仪和相机来搭建线结构光系统。投影仪投射的图片如图 4 所示。

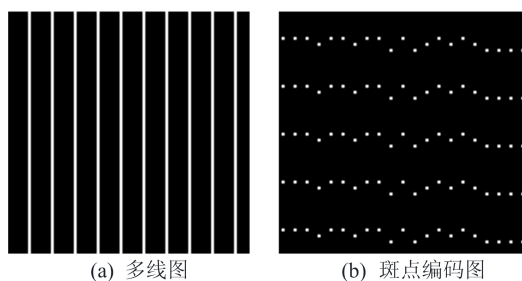


图 4 投影图像

Unreal Engine 4 仿真搭建的系统基线为 12 cm,相机焦距为 1 333.3 像素/mm,投影光轴与基线垂直,相机光轴与投影光轴夹角 15° ,且相机与投影仪处于同一高度。使用该系统测量一个高度为 30 cm、表面几何形状复杂的大卫雕像,如图 5a 所示。利用 Unreal Engine 4 相机,在距离 40 cm 处分别从前、后、左、右、上这 5 个视角拍摄,共获取 1 200 帧图片,测量过程如图 5 所示。图 5b、图 5c 分别表示投射在物体上的斑点编码图和多线图,图 5d 表示 1 200 帧图融合后的点云。

通过使用 Unreal Engine 4 仿真线结构光系统对大卫雕像的测量,验证了基于斑点位置编码

的多线结构光三维测量系统的可行性,进而开展实物仿真。

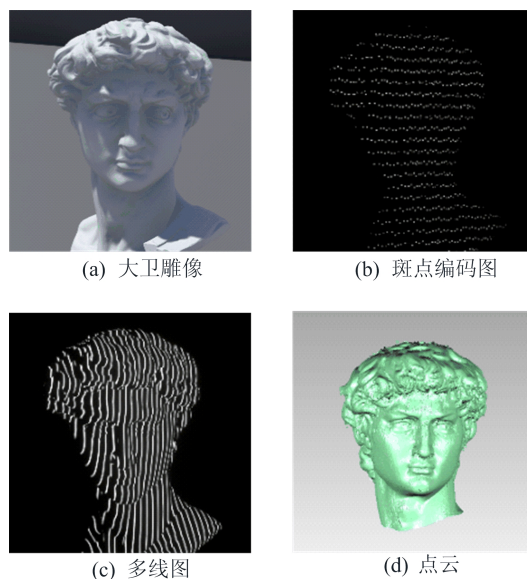


图 5 仿真测量过程

3.2 实物测量系统实验

实物测量系统由一台分辨率为 $1\ 280 \times 960$ 、焦距为 6 mm 镜头的 CCD 相机和一台分辨率为 $1\ 280 \times 800$ 并同样使用 6 mm 镜头的数字光 (digital light processing, DLP) 投影仪组成,相机的焦距为 1 678.5 像素/mm,此时结构光系统基线长度为 16.67 cm,相机光轴与投影光轴夹角为 12.57° 。

实物测量系统对距离 40 cm 处石膏雕像进行旋转拍摄测量,石膏图像如图 6a 所示。石膏雕像的高度在 45 cm 左右,共拍摄 942 帧图片,测量过程如图 6 所示。

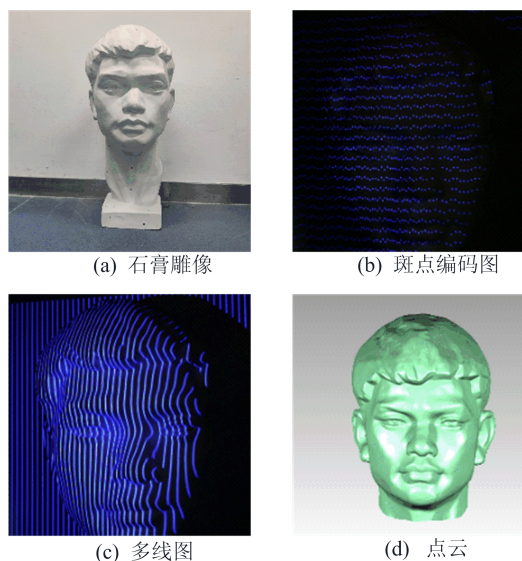


图 6 实物系统测量过程

图 6b、图 6c 分别为投射在石膏雕像上的斑点编码图和多线图,图 6d 为 942 帧图融合后的点云图。

为了验证实物线结构光三维测量系统单帧点云的精度,在 40 cm 左右处拍摄光滑平面,应用随机采样一致算法拟合平面方程,计算点云到拟合平面之间的距离均方根误差,得到均方根误差为 0.107 2 mm,计算公式如下:

$$T_{\text{dist}} = \frac{|Ax + By + Cz + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (15)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=0}^N T_{\text{dist}}^2 / N} \quad (16)$$

其中: A 、 B 、 C 、 D 为拟合平面方程的参数; N 为点云的数量。

拍摄多级阶梯标准块,该标准块每级阶梯高度差为 1 mm,高度范围从 1 mm 递增至 10 mm,测量结果和得到的点云图如图 7 所示。

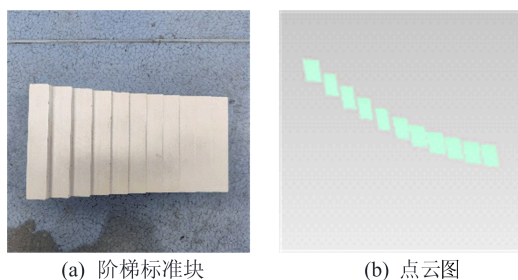


图 7 多级阶梯标准块重建示意图

计算高度差的步骤如下:

- 1) 应用随机采样一致算法计算阶梯平面方程。
- 2) 通过式(12)计算阶梯平面上的点云到相邻阶梯平面的距离。
- 3) 计算全部距离,累加后求平均值,作为阶梯的高度值。

阶梯高度的测量结果见表 1 所列。

表 1 阶梯高度实验数据		单位:mm
阶梯高度	测量高度	绝对误差
1.0	0.871 5	0.128 5
2.0	1.916 1	0.083 9
3.0	2.902 8	0.097 2
4.0	4.140 1	0.140 1
5.0	4.897 5	0.102 5
6.0	6.090 3	0.090 3
7.0	7.117 7	0.117 7
8.0	8.145 6	0.145 6
9.0	9.132 6	0.132 6
10.0	10.125 3	0.125 3

从表 1 可以看出,阶梯高度的绝对误差范围

在 0.15 mm 以内。

为验证多帧融合效果及融合后点云精度,拍摄 942 张石膏雕像图片,运用点云拼接融合算法生成最终点云模型。将该模型与真值数据对比,得到均方根误差为 0.154 2 mm,验证了融合算法的准确性。在实物测量系统中,使用 DLP 投影仪投射 3 张条纹周期分别为 100、90、80 的高频相移条纹图。采用三频四步相移算法^[18]对石膏雕像进行测量,拍摄 420 帧图像。测量结果如图 8 所示。将生成的点云模型与真值对比,得到均方根误差为 0.277 9 mm。

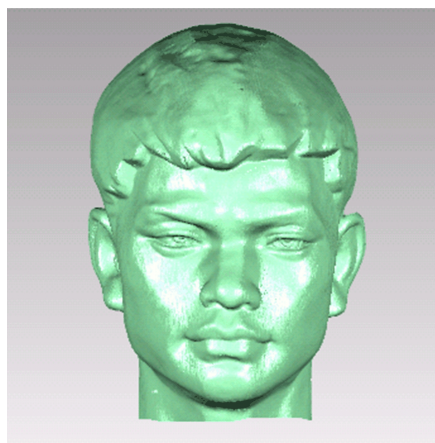


图 8 点云图

再利用文献[8]的方法,投射 7 张格雷码图对多条光条编、解码,拍摄石膏雕像后计算解码图和点云。为了区分解码效果,以不同灰度值表示光条编号。例如,1 号光条解码值记为灰度值 100,2 号光条解码值记为灰度值 101,依次类推。2 种方法的测量结果如图 9 所示。

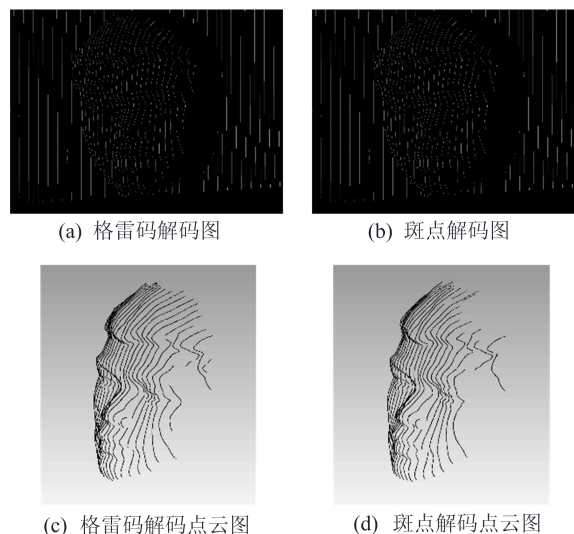


图 9 2 种方法的解码图与点云图对比

图 9a 所示为使用格雷码方法在石膏雕像上的解码图,图 9b 所示为斑点位置编码方法在石膏雕像上的解码图,图 9c 所示为格雷码方法计算的石膏雕像点云,图 9d 所示为斑点位置编码方法计算的石膏雕像点云。

实验结果表明,基于斑点位置编码的多线结构光三维测量系统测量物体是可行的,测量精度达 0.154 2 mm。编解码效果方面:与文献[8]提出的格雷码编解码多条光条方法对比,本文方法在深度变化剧烈处存在斑点位置缺失、光条断裂,使得部分光条孤立分布致无法解码,因此效果稍差于文献[8]的方法;但格雷码方法需投射 7 张图像编解码,本文仅需要 1 张斑点图即可编解码,在保证解码效果的同时速度大幅提升。精度方面:与相移法相比,虽然本文方法拍摄的图片数量增多,但重建雕像精度更高;且因投影仪和相机设备的原因会产生 γ 畸变^[19],相机捕获的条纹光栅不能满足正弦性质,而本文线结构光系统不需要做 γ 校正。

4 结 论

本文提出了一种基于多线斑点编码的高精度三维测量系统。通过投射一张编码斑点图和一张多线图完成多线编号的识别,再通过光平面或对极几何计算点云,利用投影 ICP 实现点云拼接与融合,从而实现三维测量。利用本文系统对石膏雕像进行测量,并将得到的多帧融合点云与真值对比,精度均方根误差为 0.154 2 mm,验证了基于多线斑点编码结构光三维测量系统的有效性,且测量精度较高。本文方法适用于多线源投射系统,在未来的工作中可以使用激光线代替 DLP 投影仪,用掩膜生成多线图案和编码图案来降低成本。

[参 考 文 献]

[1] 赖喜德,李广府,张惟斌,等. 涡轮叶片逆向建模与特征参数提取[J]. 西南交通大学学报,2013,48(5):915-920.
 [2] 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,2017,54(7):27-41.
 [3] 朱爽,王琳,王超. 用于机械的线结构光三维轮廓相位测量[J]. 激光杂志,2021,42(2):98-101.
 [4] MATTHIAS MARCUS A, AXEL V F, ANDREAS F. La-

ser line triangulation for fast 3D measurements on large gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,100:2423-2433.
 [5] 江洁,苗准,张广军. 点结构光动态姿态角测量系统[J]. 红外与激光工程,2010,39(3):532-536.
 [6] 程银宝,赵一帆,罗哉,等. 面结构光测量曲面特征的不确定度评估[J]. 光学精密工程,2022,30(17):2039-2049.
 [7] 孙海卫. 基于多线结构光的三维测量研究[D]. 烟台:烟台大学,2021.
 [8] 周建丰,邓学良. 一种多线结构光合成编码的三维重建方法[J]. 现代计算机,2021,27(23):119-123.
 [9] CHANIN S, KIYOSHI T. 3D profile measurement using color multi-line stripe pattern with one shot scanning[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2005, 12(4):333-341.
 [10] FAN J, JING F, FANG Z, et al. A simple calibration method of structured light plane parameters for welding robots [C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC). [S. l.]:IEEE,2016:6127-6132.
 [11] QI L, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm[J]. Optics Express,2013,21(11):13442-13449.
 [12] XING J H, LI X W, ZHAO L T. Research on roadbed settlement measurement with laser spot detection based on ellipse fitting[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,530/531:113-116.
 [13] ESTÉPAR R S J, BRUN A, WESTIN C F. Robust generalized total least squares iterative closest point registration [C]//7th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2004. Heidelberg:Springer,2004:234-241.
 [14] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,1992,14(2):239-256.
 [15] 杨曼. 基于 Kinect 三维点云重建中预处理与配准的研究[D]. 西安:西安工程大学,2018.
 [16] 许志勇,严尉剑. 基于激光雷达点云的滤波算法研究[J]. 信息通信,2018(2):80-82.
 [17] 焦亚男. 基于双边滤波器的三维点云数据去噪算法研究[D]. 天津:河北工业大学,2023.
 [18] HUANG Y N, LOU X P. Phase correction and matching based on multi-frequency heterodyne method[J]. Journal of Applied Optics,2014,35(2):237-241.
 [19] 陆军,张艺竞,王成成,等. 相位偏移 γ 矫正方法的结构光三维视觉测量技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(9):182-188.

(责任编辑 胡亚敏)