

# 基于彩色结构光的动态线扫描形貌测量方法

刘皓月, 杨凌辉\*, 马璐瑶, 樊一源

天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072

**摘要** 以高铁、铁轨为代表的延展性表面测量逐步向智能化发展, 要求在线测量, 同时兼顾效率和精度, 对动态性能提出了新的挑战。基于线阵相机条纹投影的三维形貌测量方法兼具高分辨率与高速采集, 具有延展表面三维重建领域的高动态性理论优势, 但鲁棒性较强的条纹投影测量方法需要多帧测量获得准确相位, 编码效率低, 因此减小测量周期、减少图像帧数仍是提升动态性能的迫切问题。研究基于三频彩色条纹投影的双线阵延展表面测量方法, 使用彩色条纹投影减少投影帧数, 并利用纯色图补偿法降低通道串扰。先后对被测物体投影一幅彩色编码正弦条纹图和一幅白图, 引入一维背景归一化方法降低被测物表面光学性质的影响, 基于彩色编码信息获取展开相位并根据同名相位匹配双线阵相机。所提方法有效发挥线扫描的动态优势, 仅通过两帧投影就实现运动中高质量点云的获取, 同时实现纹理映射。

**关键词** 测量; 三维形貌测量; 彩色条纹投影; 线阵相机; 点云

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232455

## Dynamic Line-Scan Profile Measurement Method Based on Color-Encoded Structure Light

Liu Haoyue, Yang Linghui\*, Ma Luyao, Fan Yiyuan

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China

**Abstract** The advancement of intelligent, extendable surface measurement, exemplified by high-speed railway and track detection, necessitates improvements in on-line measurement, efficiency, and accuracy. This requirement presents a new challenge to dynamic performance. Multiframe measurement methods using stereoscopic line-scan camera systems facilitates high-resolution and high-speed data acquisition. Similarly, the three-dimensional shape measurement method, which employs fringe projection with line-scan cameras, facilitates high-resolution and rapid data collection. These methods are advantageous for achieving high-quality three-dimensional reconstruction of extendable surfaces in motion. However, a robust fringe projection measurement method requires multiple frames to obtain accurate phase information, leading to low encoding efficiency. Thus, reducing the measurement period and decreasing the number of required image frames remain critical issues for enhancing dynamic performance. To mitigate these challenges, we introduced a dynamic measurement method for extendable surfaces using stereoscopic line-scan cameras and color-encoded three-frequency-fringe projection. We employed composite stripe projection based on color-structured light to minimize the number of projected patterns and three solid color images for effective crosstalk compensation. We sequentially projected a color-encoded sine fringe and white patterns onto the object, incorporating one-dimensional background normalization to mitigate the influence of the object's surface optical properties. This enables the acquisition of unwrapped phases based on color encoding information. Pixels in the images obtained from both cameras that share identical unwrapped phases are identified as corresponding pixels. The proposed method effectively exploits the dynamic capabilities of line-scan technology, thus achieving high-quality contour mapping through two frames and facilitating texture mapping.

**Key words** measurement; three-dimensional profile measurement; color-encoded fringe projection; line-scan camera; point cloud

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-12-05; 录用日期: 2023-12-18; 网络首发日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51975408, 52127810, 51721003)

通信作者: \*icelinker@tju.edu.cn

# 1 引言

近年来,对工件的实时三维测量在轨道交通<sup>[1-2]</sup>、航空航天<sup>[3-5]</sup>、船舶制造<sup>[6-7]</sup>等领域具有广阔的应用前景。与静态场景下的三维形貌测量不同,对于大尺寸延展表面动态测量场景,如高铁运行状态下的测量、产品传送带在线质量的检测等,待测表面在一个维度延展,需要在传感器与待测物处于相对运动状态时进行连续扫描,这对高质量点云获取提出了更大的挑战。

以线阵相机为代表的一维图像传感器可以进行动态高频、高分辨率采集<sup>[8-11]</sup>,依据硬件性能,基于一维图像扫描的形貌测量方法能够实现运动状态下快速、连续的高密度点云获取。基于条纹投影的三维轮廓术具有高精度、高分辨率等优点<sup>[11-13]</sup>,是视觉测量方法中的研究热点,因此条纹投影术和线阵相机结合进行表面重建在动态延展表面测量领域具有重要的发展潜力。Sun 等<sup>[14-15]</sup>提出了基于单幅伪随机条纹结构光的双线阵相机三维表面测量方法,但误匹配现象较多。基于正弦条纹投影的方式降低了一维图像的匹配难度,Lilienblum 等<sup>[16]</sup>使用双共面一维图像传感器结合相移法获取点云,实现对大尺寸物体的高分辨率表面重建,但深度范围受限,且有明显系统误差。Denkena 等<sup>[17]</sup>使用单线阵 CCD 通过傅里叶轮廓术检测工件表面缺陷,但单帧傅里叶方法难以适应突变和非连续性表面。Liao 等<sup>[18]</sup>提出双线阵相机多帧傅里叶匹配算法,使用时间相位展开法提升鲁棒性,解决了上述问题,但单个重建周期需要 4 帧图像。多帧投影使得系统动态性能受限,一个投影周期中机构的高速运动对整体测量精度影响严重,因此仍需提高条纹投影编码效率,以适应线阵相机的高频采集。

注意到,除时间编码方法外,红、绿、蓝颜色通道可以作为载体编码条纹<sup>[19-21]</sup>,可从单个捕获图像中获取 3 个不同的编码图,减少了投影的图像。但为了避免颜色视觉盲区,大多数彩色传感器和投影仪都会设计成光谱重叠,因此颜色通道间的串扰不可避免<sup>[22-23]</sup>;同时,颜色通道灵敏度、信噪比不同,更加容易受到背景噪声、物体表面反射率变化的影响<sup>[24]</sup>。因此,使用线阵相机进行基于彩色复合条纹的高质量三维重建仍是重要挑战。

基于上述思路,本文研究基于三频彩色复合条纹与双线阵立体视觉的动态延展表面测量方法,将 3 幅不同频率的正弦条纹编码到不同颜色的结构光里进行

同步投影与采集,从原理上减小了测量周期内系统与被测物的相对运动对测量的影响,提升了系统的动态性能。为提高三维重建的质量,用一维纯色图串扰标定法简单有效地补偿了线阵图像中颜色通道间的串扰,用一维背景归一化的方式解决复合条纹测量对背景噪声和被测物表面光学性质敏感的问题,并获取了待测物表面的纹理信息。系统采用双目彩色线阵相机与投影仪结合的结构,循环投射彩色复合结构光与白色纯色光,采用傅里叶变换算法匹配双相机,根据立体视觉模型解算 3D 点坐标。由于高频采集,线阵相机可达到接近单帧测量的动态性能。实验结果表明,所提方法能够实时高质量地重建运动中的三维表面,具备适用性、准确性及时效性。

## 2 基本原理

### 2.1 系统整体结构

系统整体流程如图 1 所示。对投影仪的三个彩色通道分别编码三个不同周期的正弦条纹,三通道同时投影,形成彩色复合条纹图。采用双线阵相机与投影仪结合的结构,在被测物表面循环投射彩色复合条纹图与白色纯色图,投影仪与相机同步触发,1 幅投影图触发相机采集 1 次。为了适应线阵相机的高频采集,投影仪采用二进制条纹离焦投影技术实现高速投影<sup>[25]</sup>,将条纹图的 8 bit 降为 1 bit,通过投影仪散焦近似为正弦条纹,如图 2 所示。投影过程中待测物体在运动平台上匀速移动。从双线阵相机采集的图像中分离白色图与彩色条纹图,并将两个图像拆分成三通道灰度图分别进行串扰补偿。使用一维背景归一化消除背景噪声,利用傅里叶变换算法和投影距离最小(PDM)算法进行相位的提取和解包裹,实现双相机在一维图像上的精准匹配,并通过立体视觉模型解算 3D 点坐标。投射的白图用于一维背景归一化,同时从中可以获取物体的表面纹理信息。

对于系统的架构,两个彩色线阵相机并排放置且调至共面,相机光心连线正交于运动平台,投影仪安装在相机的中间。整个传感系统固定于龙门架上,被测物体放在高精度导轨运动平台上,运动平台提供匀速直线运动。

### 2.2 双线阵相机成像模型

如图 3 所示,两个线阵相机共面放置,以右线阵相机为例,成像模型可表示为

$$\begin{cases} r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0) \cdot F_x + C_x + \Delta u = u \\ r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \\ r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $P_0(X_0, Y_0, Z_0)^T$  是线阵相机光心在世界坐标系下的投影点坐标,是线阵相机坐标系的原点; $r_{ij}(i, j =$

$1, 2, 3)$  是世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵的元素;使用  $P_0(X_0, Y_0, Z_0)^T$  与旋转矩阵作为相机的外参;

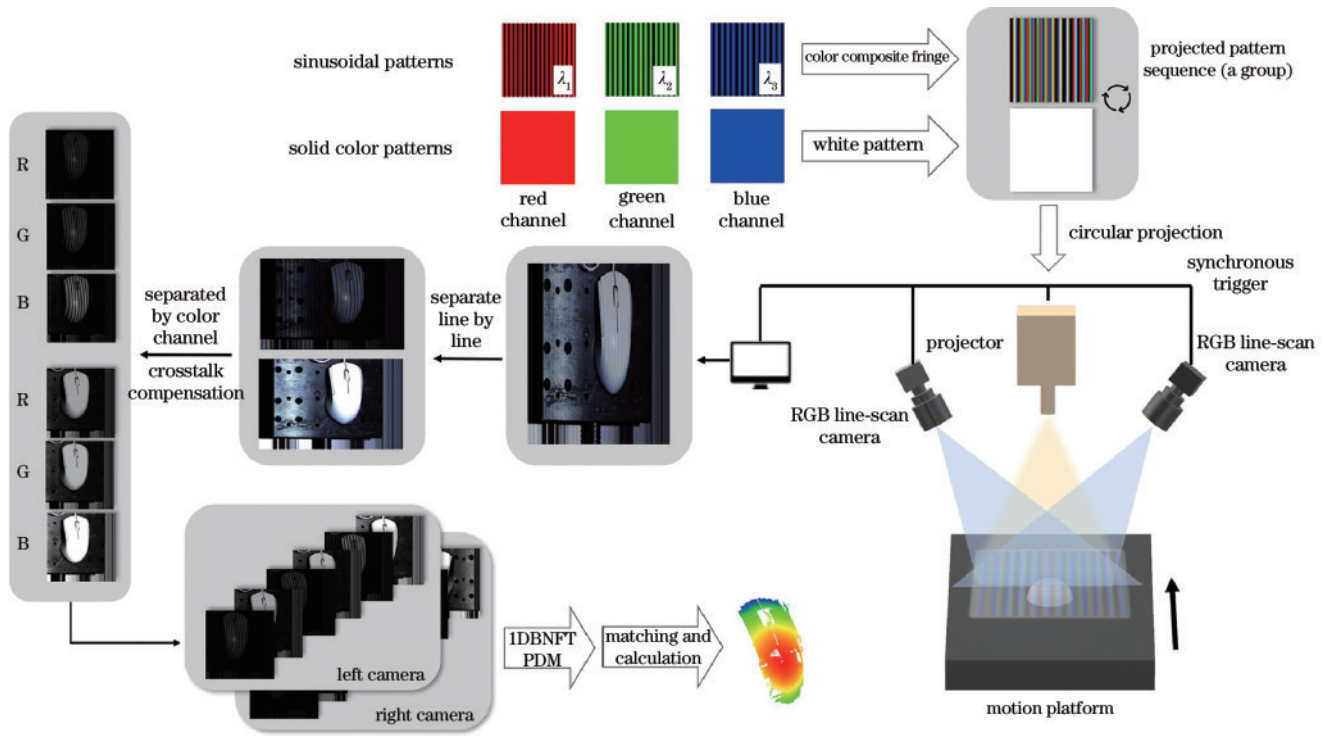


图 1 基于彩色复合结构光的双线阵相机延展表面测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of the extendable surface measurement system based on color-encoded fringe projection and stereoscopic line-scan cameras

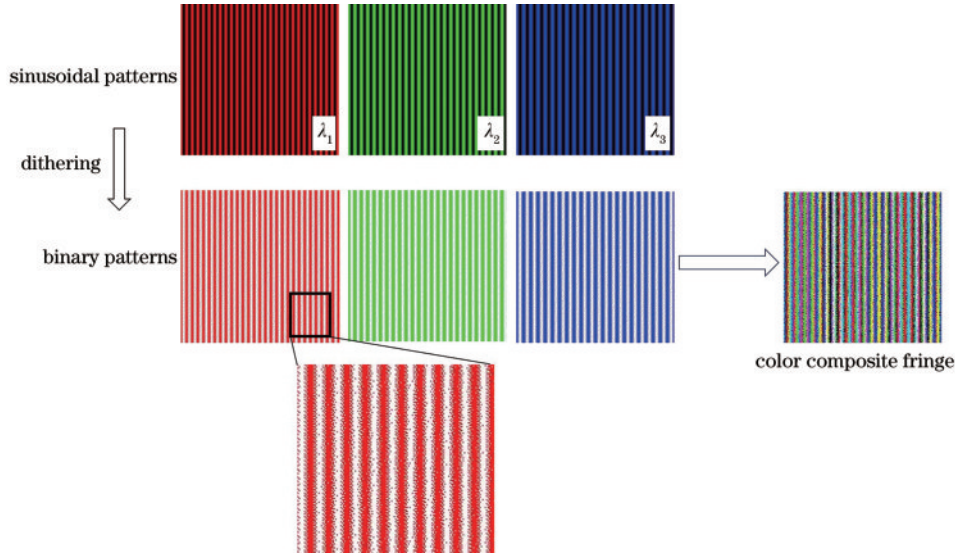


图 2 经过二值抖动的彩色条纹投影图

Fig. 2 Color composite fringe after binary dithering

$F_x$  是等效焦距, 即相机焦距与  $u$  方向像元尺寸之比;  $(C_x, 0)^T$  是图像坐标系中的光心坐标。上述参数通过对双线阵相机进行标定来获取。 $P(X, Y, Z)^T$  是世界坐标系下的物点坐标,  $p(u, 0)^T$  是对应线阵图像上的像点坐标。

$\Delta u = n_1(u - C_x)^5 + n_2(u - C_x)^3 + n_3(u - C_x)^2$ , (2)  
 式中:  $\Delta u$  是线阵相机的畸变, 考虑前两阶的径向和切向失真;  $n_1, n_2, n_3$  均是失真系数。

利用两个线阵相机的成像模型和最小二乘法计算得到  $P$  点坐标。整个测量装置保持静止, 被测物在导轨上进行匀速直线运动, 通过事先标定已知导轨的三轴运动速度与方向, 可将点云延展到运动维度。

$$\begin{cases} X_i = X - \frac{v_x \times n}{F_{ac}} \\ Y_i = Y - \frac{v_y \times n}{F_{ac}} \\ Z_i = Z - \frac{v_z \times n}{F_{ac}} \end{cases}, \quad (3)$$



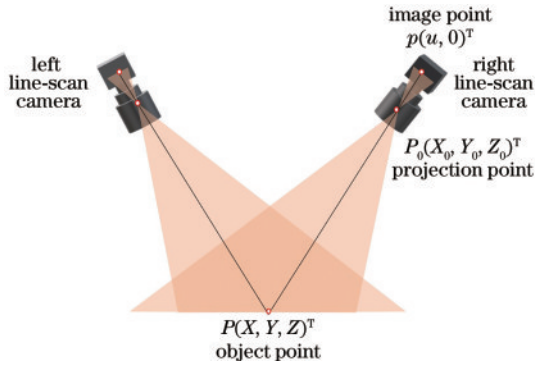


图3 双线阵相机测量模型

Fig. 3 Measurement model of stereoscopic line-scan cameras

式中:  $v(v_x, v_y, v_z)^T$  为被测物的三轴运动速度;  $F_{ac}$  是相机的采集频率。当拍摄第  $n$  行的一维图像时, 相机与物体之间的相对位移为  $\frac{v_d \times n}{F_{ac}}$ ,  $d = x, y, z$ 。

### 2.3 一维背景归一化与双线阵相机像点匹配方法

由于线阵相机只在一维方向上成像, 很难根据图像的特征进行匹配, 因此本文根据同一正弦条纹投影点在双相机处的展开相位相同的原理, 进行双相机匹配。傅里叶变换轮廓术(FTP)可在单个条纹变形图中快速计算折叠相位。为了获取正确的条纹展开级次, 并扩大测量的深度范围, 使用PDM算法<sup>[26]</sup>计算展开相位。由于彩色结构光对环境噪声与物体表面反射率敏感, 对采集到的一维条纹图使用同一测量位置的白色纯色图进行背景减除并归一化, 可以有效抑制背景干扰, 如图像局部过曝或反射率变化。

对理想正弦条纹进行二值抖动, 投影图案的背景强度和条纹幅度都为  $1/2$ , 理想情况下(无串扰), 二进制条纹离焦投影下相机捕获的一维条纹图三通道的灰度函数为

$$g_c(u) = \frac{1}{2} \rho_c(u) + \frac{1}{2} \rho_c(u) \cos[2\pi f_c u + \varphi_c(u)],$$

$$c = r, g, b, \quad (4)$$

式中:  $\rho_c(u)$  为物体表面对三色光的反射率;  $f_c$  为相机观测正弦条纹图的基频;  $\varphi_c(u)$  为携带物体表面形貌信息的调制相位。每个通道编码的条纹频率不同, 但是需要满足最小公倍数原则, 即条纹周期的最小公倍数应大于投影仪的横向像素, 以获得正确的条纹级次组合<sup>[27]</sup>。

为了去除背景光和被测物表面反射率的影响, 利用白色纯色图(投影仪所有像素设置为 255)对条纹图进行背景归一化。相机采集到的白图三通道的灰度函数为

$$g_{c0}(u) = \rho_c(u). \quad (5)$$

对同一测量周期中的条纹图与白图的三通道灰度函数对应进行背景归一化:

$$g_d(u) = [2g_c(u) - g_{c0}(u)] \cdot \frac{1}{g_{c0}(u)} = \cos[2\pi f_c u + \varphi_c(u)]. \quad (6)$$

对归一化后的图像灰度函数使用FTP, 提取含有相位信息的基频分量, 对其进行逆变换, 取其中的角度部分, 得到每个通道编码光的折叠相位函数  $\varphi_c(u)$ , 函数值范围为  $-\pi$  到  $\pi$ 。对于一个彩色复合条纹图, 共得到 3 个折叠相位函数。折叠相位函数与对应展开相位函数的关系为

$$\phi_c(u) = \varphi_c(u) + k_c \cdot 2\pi, \quad (7)$$

式中:  $k_c$  为相位展开级次。三通道的展开相位函数具有的关系为

$$\Phi \circ \frac{1}{f_c} \equiv 2\pi \cdot x_p, \quad (8)$$

式中:  $x_p$  是被测点对应的投影仪坐标。

由正确的条纹级次组合确定的展开相位点  $\Phi(\phi_r(u), \phi_g(u), \phi_b(u))^T$  理论上应落在由式(8)确定的空间直线上。但由于噪声的存在, 展开相位点距离空间直线会有一定的距离, 因此取距离最小的点为正确的条纹展开级次。双相机分别得到条纹展开相位, 对具有相同条纹展开相位的像素点进行匹配。

### 2.4 一维纯色图串扰补偿方法

由于所提方法要求将所采集的图像拆分成三个单通道灰度图像进行后续计算, RGB分量分离的程度直接影响测量的精度。彩色通道间的串扰主要来自两个方面: 投影仪与彩色 CCD 或 CMOS。Digital light processing(DLP)色轮上三基色的光谱间存在叠加, 彩色相机传感器每个通道也会对更宽频谱范围内的光进行响应。因此, 单独从一个通道内提取的信息会受到别的颜色通道信息的影响, 不能直接进行应用。由于DLP投影仪与相机的颜色通道间频谱重叠是固定的, 因此可以通过提前标定通道间串扰的程度, 得到串扰系数矩阵, 对彩色相机采集到的一维图像进行补偿。

将红色、绿色、蓝色的纯色投影图分别投射到白纸的表面, 使用两个彩色线阵相机分别进行采图, 并将采集到的图像分离为三通道灰度图。以采集的红色纯色图为例, 如图4所示(采集和处理的图像均为  $4096 \times 1$  的一维图像, 为方便展示, 这里将其复制 800 行扩展为  $4096 \times 800$  的二维图像进行说明), 彩色线阵相机采到一幅图后, 将其分离成 RGB 三通道灰度图像, 其强度为  $I_{Rc}$ 。图4中分离出的绿色和蓝色通道图像也具有一定的强度, 代表红色信息串扰到绿色与蓝色通道内。对三幅纯色图的采集图像进行相同的操作, 提取出每幅图像的三通道灰度图, 共 9 幅图像, 组成强度矩阵,

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{Rr} & I_{Rg} & I_{Rb} \\ I_{Gr} & I_{Gg} & I_{Gb} \\ I_{Br} & I_{Bg} & I_{Bb} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

关于红色信息串扰到另外两个通道的程度, 用 R

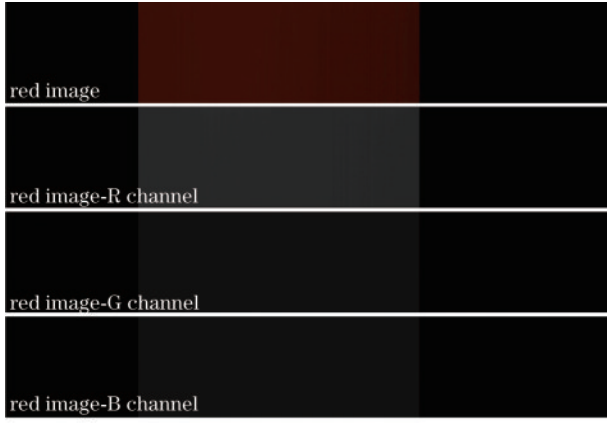


图4 彩色线阵相机采集的红色纯色图以及分离的三通道图像  
Fig. 4 Red image captured by RGB line-scan camera and separated three-channel images

通道对其他通道的串扰系数  $K_{rc}$  来表示,

$$K_{rc} = \frac{I_{Rc}}{I_{Rr}} \quad (10)$$

同理可得到绿色和蓝色通道对三通道的串扰系数。串扰系数矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rg} & K_{rb} \\ K_{gr} & K_{gg} & K_{gb} \\ K_{br} & K_{bg} & K_{bb} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $K_{rr} = K_{gg} = K_{bb} = 1$ 。

以串扰系数对每个通道的灰度图进行补偿,补偿公式为

$$\begin{cases} I_r(u) = \frac{I_{r0}(u) - K_{gr}I_{g0}(u) - K_{br}I_{b0}(u)}{1 - K_{gr}K_{rg} - K_{br}K_{rb}} \\ I_g(u) = \frac{I_{g0}(u) - K_{rg}I_{r0}(u) - K_{bg}I_{b0}(u)}{1 - K_{rg}K_{gr} - K_{bg}K_{gb}} \\ I_b(u) = \frac{I_{b0}(u) - K_{rb}I_{r0}(u) - K_{gb}I_{g0}(u)}{1 - K_{rb}K_{br} - K_{gb}K_{bg}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $I_{c0}(u)$  是线阵相机采集到的图像分离的三通道灰度图的原始强度;  $I_c(u)$  是补偿串扰后的三通道灰度图的强度。

### 3 实验与分析

为了验证所提方法的可行性与优势,搭建了图5所示的延展表面测量系统。该系统包括2台带35 mm镜头的RGB线阵相机(MV-CL042-90GC)和1台投影仪(Texas Instruments DLP LightCrafter4500)。线阵相机的分辨率为4096像素。系统工作距约为700 mm,两个相机之间的基线约为550 mm。在视场中央垂直于相机基线处放有一个高精度导轨。线阵相机与投影仪同步触发。双线阵相机在测量前已提前调至共面,整个测量系统在测量前对相机的内外参以及高精度导轨的运动方向进行了标定。由于线阵相机只在一维方向上成像,无法使用棋盘格等常见的面阵相机标定技

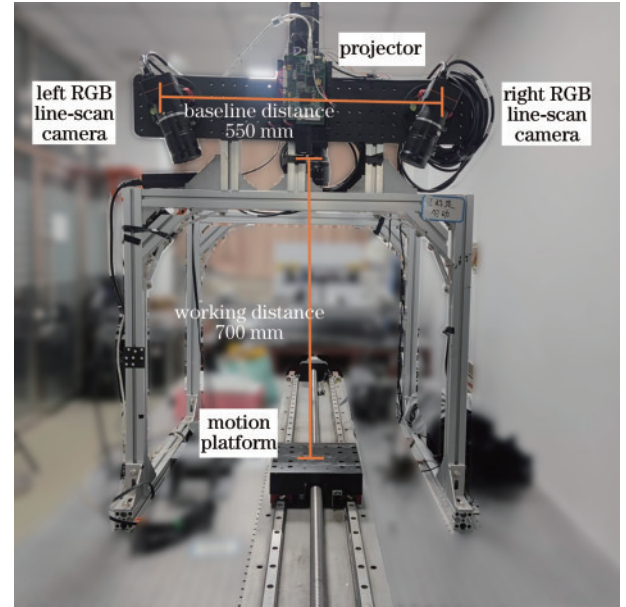


图5 延展表面测量系统的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of the extendable surface measurement system

术,因此采用空心条纹立体靶标<sup>[28]</sup>利用交比不变性与调和共轭原理对双线阵相机进行静态标定。

投影仪的投影图案设置为彩色复合条纹图和白色纯色图(DMD芯片全部为“开”的状态),循环投射,依据实验要求,设置每个投影图案以进行一次触发信号的输出,触发一次相机采集,投影仪和相机以167 Hz的投影和采集频率同步触发。实验中投影频率受限于投影仪的亮度,当投影仪亮度增加时,曝光时间缩短,投影频率可大幅提升。三通道编码的正弦条纹周期分别为14、16、18。

利用激光跟踪仪检验精密导轨的运动方向误差,在导轨平台上放置激光跟踪仪靶球,从运动轨迹中选取10个点的坐标并拟合一条直线,点与线的偏差均方根误差(RMSE)为0.009 mm,导轨精度较高。理论上传感器的横向分辨率为0.14 mm,为使线阵相机获取的延展点云在运动方向上不被拉伸或压缩,需要保持传感器的横向分辨率(单次采集的轮廓上)与纵向分辨率(被测物在导轨运动延展的方向上)基本一致。纵向分辨率的公式为

$$Dv = \frac{v}{F_{ac}} \quad (13)$$

因此需要对被测物的运动速度与线阵相机的采集频率进行控制,应满足

$$v = \frac{D \times F_{ac}}{k \times F_x \times N_{pa}}, \quad (14)$$

式中:  $D$  为双线阵系统的工作距,为700 mm;  $F_{ac}$  是采集频率;  $F_x$  是焦距与像元尺寸之比,为5000;  $k$  是被测物运动速度在垂直于线阵相机视场方向上的分量占比,为1;  $N_{pa}$  表示一个投影周期内投影图的数量,为2。

位移平台的运动速度设置为 11.9 mm/s。

首先使用 2.4 节的方法进行串扰的标定与补偿。通过在一张白纸上投射红、绿、蓝纯色图,对每幅投影图通过双线阵相机的三通道进行采集,得到 3 幅一维串扰标定图。对两个相机分别计算串扰系数矩阵,

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.1587 & 0.0085 \\ 0.3371 & 1 & 0.0037 \\ 0.0587 & 0.1850 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.1638 & 0.0094 \\ 0.3402 & 1 & 0.0036 \\ 0.0590 & 0.1889 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

对彩色条纹图和白图拆分成的三通道灰度图分别用式(12)进行串扰补偿。实验结果表明,补偿后通道间串扰对测量的影响大大减轻。以投影蓝色纯色图为

例,如图 6(a)所示,选择线阵相机采集的一幅蓝色纯色图片,提取其三通道强度值,可以看出红色与绿色图像信息串扰到了蓝色通道内。由于三通道的条纹频率不一致,彩色复合条纹图会产生周期性的“拍频”,不同颜色通道条纹叠加后,由于通道间串扰,从单通道中直接分离提取的条纹图案会有周期性的明暗变化,如图 7(a)所示,造成相位计算时的误差,影响双相机匹配,从而使点云缺失严重。而串扰补偿后,从图 6(b)可看出红绿信息的串扰大幅减少,反映在条纹图上,如图 7(b)所示,单通道条纹图的周期性变化被抑制,可用于进一步的计算。对实验中采集的彩色条纹图与白图的三通道串扰进行补偿后,对各个通道对应进行背景归一化,例如对彩色条纹图的 R 通道条纹图与对应白图的 R 通道灰度图进行式(6)所示的计算,抑制背景干扰。

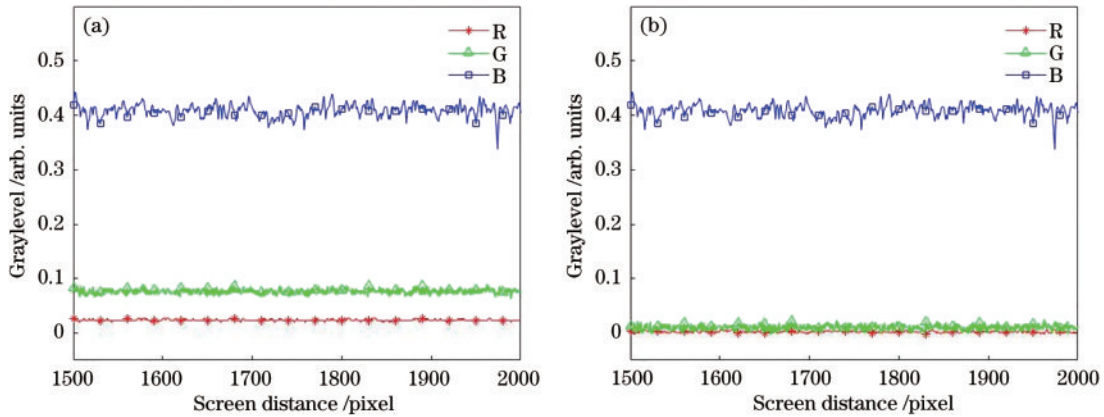


图 6 蓝色纯色图的某行捕获图像强度。(a)串扰补偿前;(b)串扰补偿后

Fig. 6 Intensity of a captured image of a row in the blue image. (a) Before crosstalk compensation; (b) after crosstalk compensation

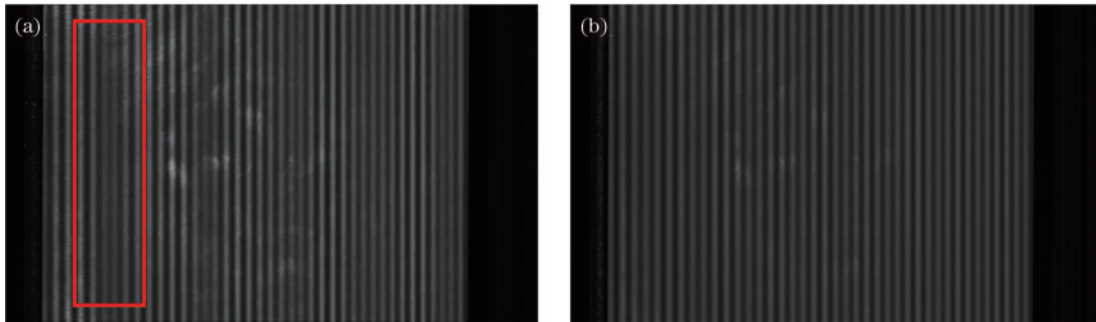


图 7 单通道提取的条纹图。(a)串扰补偿前;(b)串扰补偿后

Fig. 7 One of the sinusoidal fringe images extracted from a single channel. (a) Before crosstalk compensation; (b) after crosstalk compensation

### 3.1 测量系统精度验证实验

为了评定本系统对理想表面的重建精度,分别对标准陶瓷平板和双球模型进行测量精度验证实验。陶瓷平板经标准检定,平面度为 0.008 mm。将点云拟合为一个平面,用点到最佳拟合平面(C2M)的距离的 RMSE 表示测量精度,陶瓷平板点云的 RMSE 为 0.074 mm。图 8 表示了陶瓷平板的点云测量结果,点云颜色表示点到最佳拟合平面的距离。生成的点云较

为完整,具有高密度的特点,X方向(线阵相机视场方向)与 Y 方向(导轨运动方向)分辨率均为 0.14 mm。

由于陶瓷平板是一个标准平面,不是一个典型的 3D 物体,因此使用图 9(a)所示的双球模型进行测量,验证重建的准确性。双球由两个固定位置的标准球与金属底座组成。标准球直径为 38.100 mm,误差为 0.003 mm。双球与激光跟踪仪的靶球尺寸一致,结构上可替换,利用激光跟踪仪分别测得双球球心坐标,计



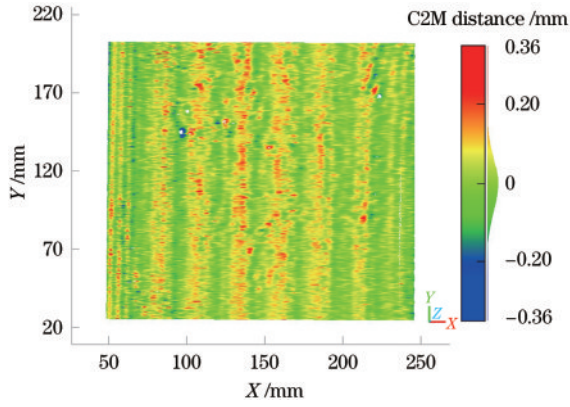


图 8 陶瓷平板测量点云  
Fig. 8 Point cloud of ceramic plate

算得到球心距,测量 10 次均值为 118.900 mm,标准差为 0.004 mm。以测量球心距与标准球心距的误差绝对值作为评价指标,以点云到标准拟合球体的距离的 RMSE 为球体测量精度。图 9(b)为线阵相机扫描结果拼接后的测量图像,球表面具有微弱反光,且表面具有一定的高度范围。双球的点云测量结果如图 9(c)所示,在双球模型的复杂光学性质下,没有因反光出现点云丢失或误匹配的现象,说明背景归一化后的彩色结构光算法具有一定的抗环境光干扰的能力。

构建已知直径的标准球体对 3D 点云的双球表面部分进行拟合,评价系统位置测量精度,如图 10 所示。计算得到的测量球心距为 118.823 mm,球心距误差绝对值为 0.077 mm。

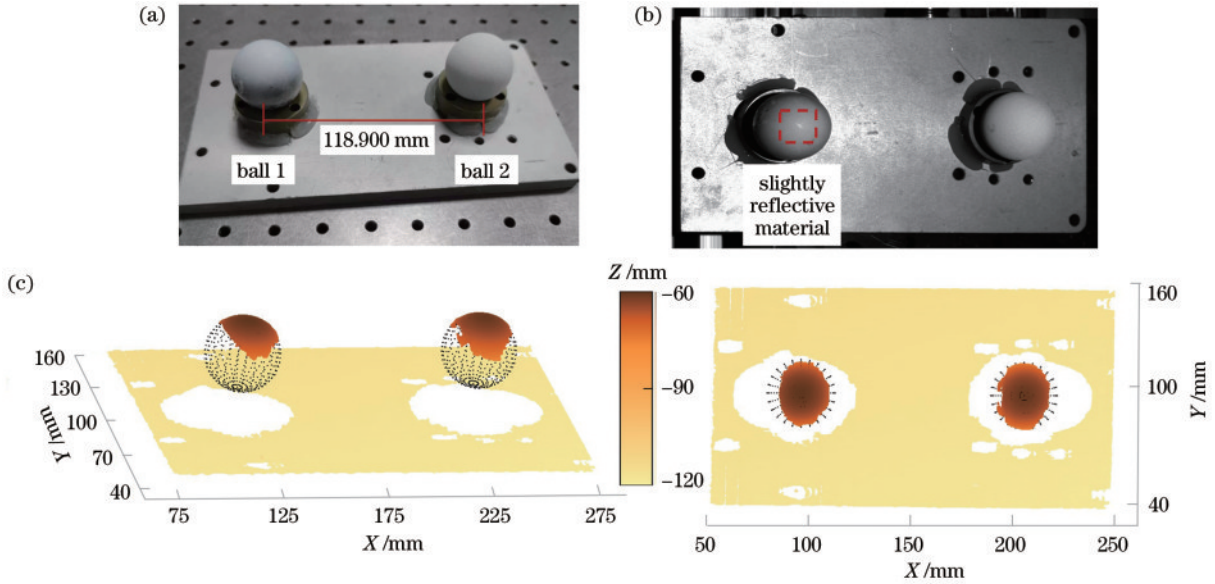


图 9 双球模型实物与测量结果。(a) 实物图;(b) 相机采集拼接图;(c) 点云测量结果图  
Fig. 9 Double-sphere model and measurement result. (a) The model; (b) stitched image by the line-scan camera; (c) point cloud of the model

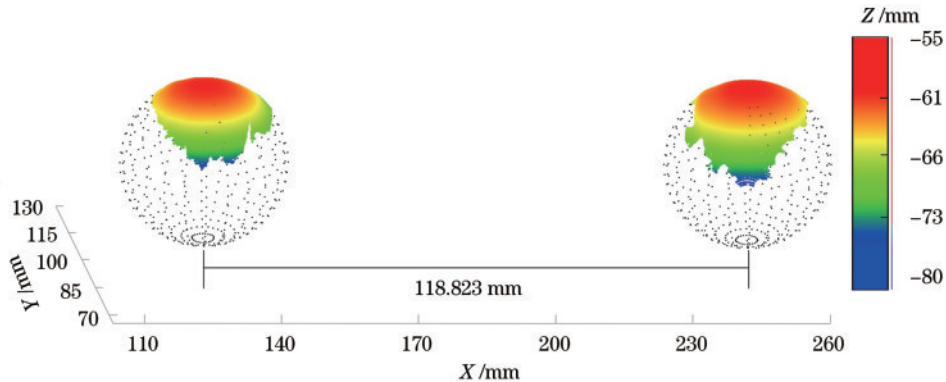


图 10 拟合球体的球心距  
Fig. 10 Distance between the center of the fitted spheres of point cloud

对双球模型的球表面进行分析,图 11 中点云颜色表示点到标准球体的距离,球 1 的 RMSE 为 0.170 mm,球 2 的 RMSE 为 0.131 mm。由于球体的边缘处较暗且难以测量,选择球顶部进行进一步分析,验证局部特征

精度,如图 12 所示,球 1 的 RMSE 为 0.069 mm,球 2 的 RMSE 为 0.060 mm。点云重建并没有因为运动方向上轮廓的非重复性和运动的影响而产生较大误差,具有较高的动态性能,证明了本系统的测量精度。

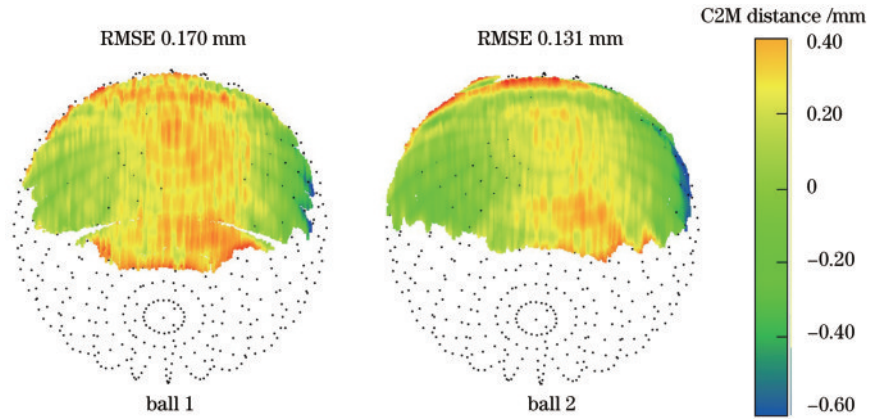


图 11 双球模型中标准球点云测量结果

Fig. 11 Measurement results of the standard balls of the double-sphere model

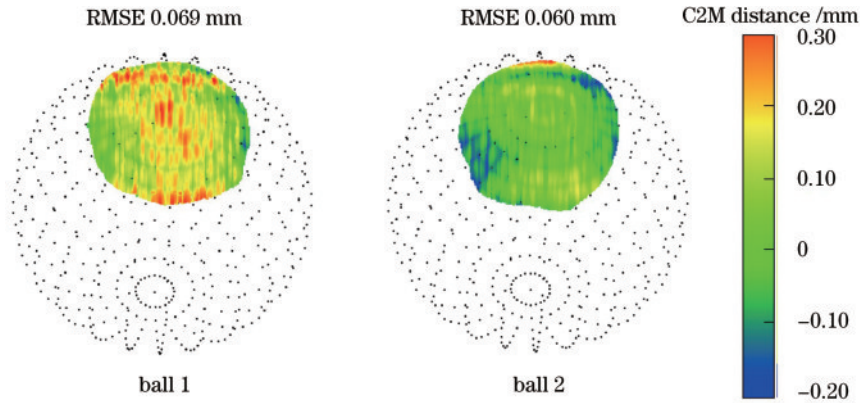


图 12 双球模型中标准球顶部测量点云测量结果

Fig. 12 Measurement results of the top of the standard balls of the double-sphere model

### 3.2 形貌复杂物体测量实验

为了验证所提方法的适应性,对形貌较为复杂的物体进行测量。如图 13 所示,路由器表面具备一定的纹理,同时表面有多个狭缝,构成了较为复杂的形貌,具备一定的测量难度。为了更清楚地显示测量过程,将相机采集的图片和串扰补偿后的图片分别提取出

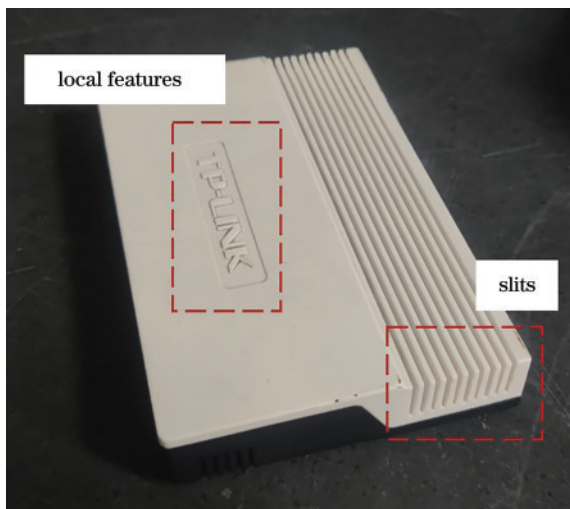


图 13 路由器实物图

Fig. 13 The router

来,如图 14 所示,左右列分别为左右线阵相机采集的图像,5 行分别为相机采集的彩色复合条纹图、白图以及分离出的串扰补偿后的三通道灰度图。需要注意的是,串扰补偿、双相机匹配及三维点解算都是基于一维图像的,这里为了方便显示,将其在运动方向上根据采集时间拼接成二维图像。

图 15 为附有纹理的点云和反映高度信息的热力图点云。在双线阵相机公共视场彩色结构光能照射到的范围内,所有狭缝位置与形貌均被测出,有较好的重建效果。如图 15 的细节放大图所示,从点云能够识别小间隙、小的高度起伏,结果表明所提方法具备细节测量能力。点云上的纹理有助于特征识别和定位,对定位细节特征起到重要作用。

测量了图 16(a)所示的金属工件,以显示系统的深度范围和点云的完整性。图 16(b)为点云测量结果,点云的颜色反映了工件表面高度信息。金属工件表面是灰色的金属纹理,并具有多个通孔,通孔处无点云,这就导致其表面的不连续。同时工件由两个倾斜表面组成,具有一定的深度范围。测量中点云较为完整,没有出现大面积点云缺失的情况。通孔处及立体视觉盲区部分没有进行强制匹配,保证了点云的精度。实验结果表明所提方法在保证点云质量的情况下扩展了点云的深度范围。



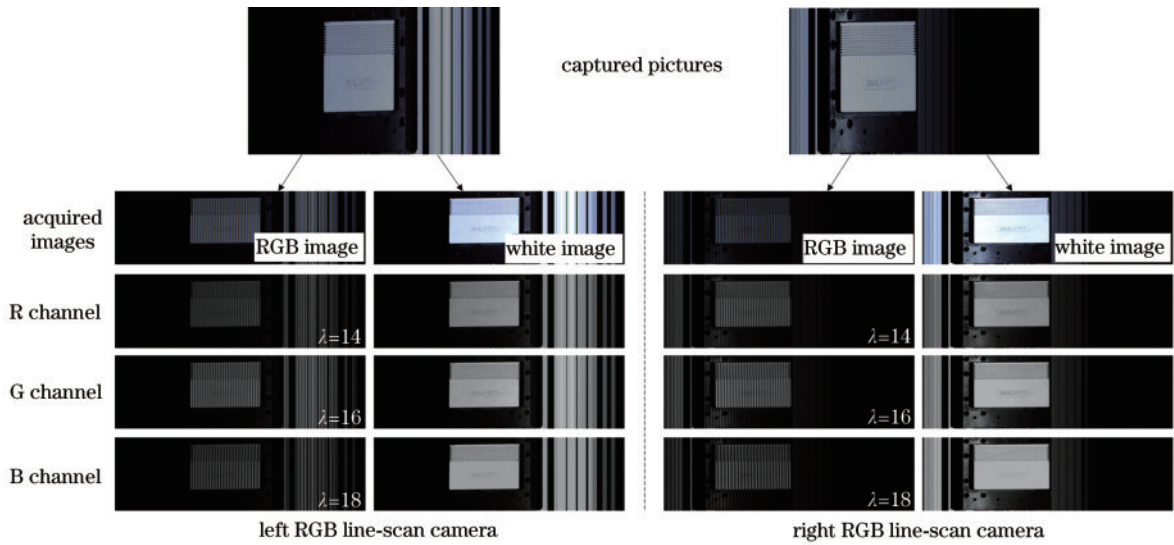


图 14 左右相机采集的路由器图像

Fig. 14 Images of the router obtained by left and right cameras

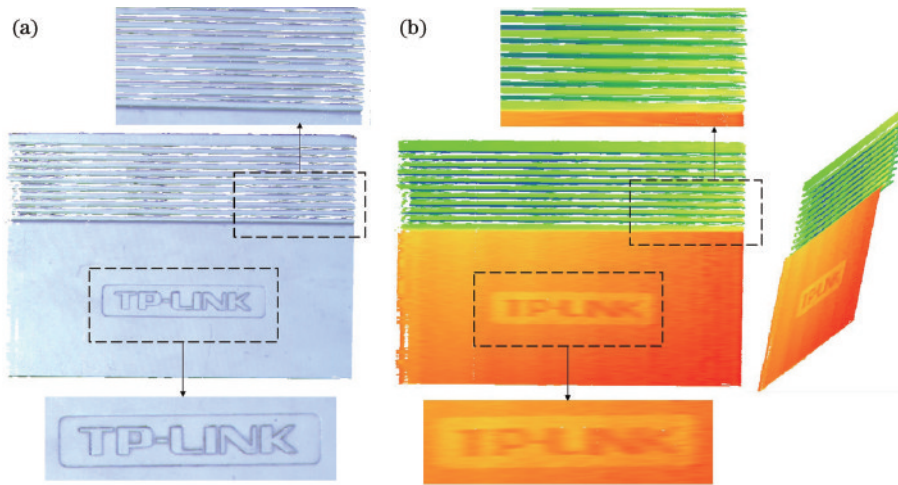


图 15 路由器点云测量结果及细节。(a)附有纹理的点云;(b)反映高度信息的热力图点云

Fig. 15 Point cloud and details of the router. (a) Point cloud with texture; (b) heat map point cloud reflecting height information

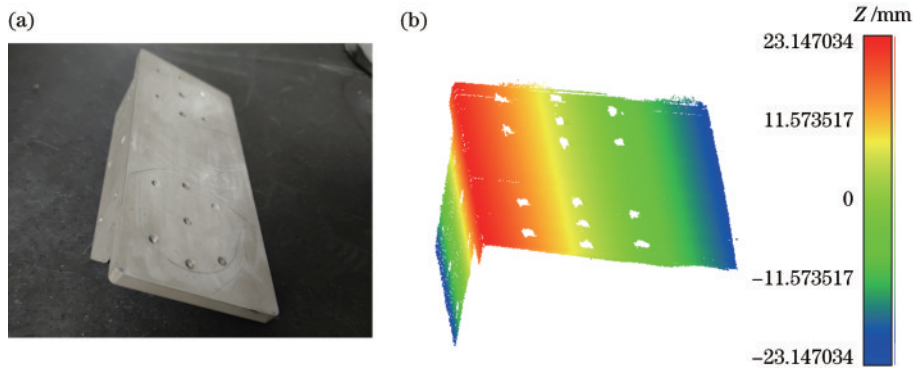


图 16 金属工件。(a)实物图;(b)点云测量结果

Fig. 16 Metal workpiece. (a) Photo of the object; (b) point cloud measurement result

以实验室现有蓝光扫描系统(测量范围为  $300\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ , 测量精度优于  $50\text{ }\mu\text{m}$ )测量的精确金属工件点云作为点云基准, 与本系统的点云测量结果进行对比。图 17(a)显示了从本系统中获得的点云

以及从蓝光扫描系统中获得的点云。使用迭代最近点(ICP)算法对点云进行配准, 结果如图 17(b)所示, 本系统测量的点云与标准点云形貌一致, 通孔位置定位准确, 证明了所提方法的测量准确性。

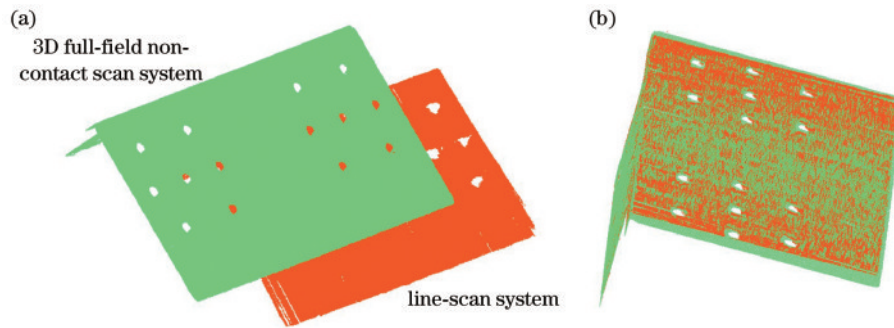


图 17 金属工件测量点云与标准点云。(a)配准前;(b)配准后

Fig. 17 Measurement point cloud and standard point cloud of metal workpiece. (a) Before registration; (b) after registration

## 4 结 论

提出一种基于三频彩色复合条纹投影与双线阵立体视觉的动态线扫描延展表面测量方法,在投影仪三通道编码不同的条纹,并提出基于纯色图标定形成标定矩阵的方法补偿一维图像通道间串扰,使用一维背景归一化克服彩色投影方法对物体表面光学性质敏感的问题。所提方法仅使用两帧图像即可通过双线阵相机获取三维轮廓线,并对其在导轨方向进行延展连续拼接,结合线阵相机的高采集频率特性,实现延展表面的动态连续点云测量。该方法突破了传统结构光方法中图像帧数多、测量效率低、点云密度低的限制,丰富了点云信息,为工业场景中延展表面的高动态、高精度测量提供了具有潜力的研究方案。

实验结果表明,所提方法可以有效抑制通道间串扰,对球面、弱反光面等复杂表面具有鲁棒性,有较好的三维表面重建效果。值得指出的是,本实验中的采集频率受限于投影仪的亮度,当投影仪亮度满足要求时,曝光时间缩短,采集频率可大幅提升。

## 参 考 文 献

- [1] 李清泉,毛庆洲.道路/轨道动态精密测量进展[J].测绘学报,2017,46(10):1734-1741.  
Li Q Q, Mao Q Z. Progress on dynamic and precise engineering surveying for pavement and track[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1734-1741.
- [2] 张海洋,陈巍,叶松涛,等.基于双目结构光的高铁白车身三维测量方法[J].控制与信息技术,2020(3):22-28.  
Zhang H Y, Chen W, Ye S T, et al. A three-dimensional measurement method for high-speed train body based on binocular structural light[J]. Control and Information Technology, 2020(3): 22-28.
- [3] Saadat M, Cretin L. Measurement systems for large aerospace components[J]. Sensor Review, 2002, 22(3): 199-206.
- [4] Long K, Xie Q, Lu D N, et al. Aircraft skin gap and flush measurement based on seam region extraction from 3D point cloud[J]. Measurement, 2021, 176: 109169.
- [5] Xia R B, Zhao J B, Zhang T Y, et al. Detection method of manufacturing defects on aircraft surface based on fringe projection[J]. Optik, 2020, 208: 164332.
- [6] 冯建明,赵锐.三维扫描技术在船舶修理中的应用[J].船舶标准化工程师,2023,56(2):54-56,67.  
Feng J M, Zhao R. Application of 3D scanning technology in ship repair[J]. Ship Standardization Engineer, 2023, 56(2): 54-56, 67.
- [7] 黄若波,张杰.基于全站仪和船舶3D设计系统的三维精度测量技术研究[J].造船技术,2011(4):14-16.  
Huang R B, Zhang J. Research on 3D precision measurement technology based on total station and ship 3D design system[J]. Marine Technology, 2011(4): 14-16.
- [8] Godber S X, Robinson M, Evans J O. Line-scan sensor: an alternative sensor modality for the extraction of three-dimensional coordinate information[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10): 3044-3054.
- [9] Lilienblum E, Al-Hamadi A. Pattern optimization for 3D surface reconstruction with an active line scan camera system[C]//2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 7-10, 2018, Athens, Greece. New York: IEEE Press, 2018: 3159-3163.
- [10] Liao R Y, Yang L H, Ma L Y, et al. In-motion continuous point cloud measurement based on bundle adjustment fused with motion information of triple line-scan images[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21544-21567.
- [11] 马璐璐,郝继贵,杨凌辉,等.延展表面高分辨率形貌测量方法综述[J].激光与光电子学进展,2023,60(8):0811005.  
Ma L Y, Zhu J G, Yang L H, et al. Review of high-resolution shape measurement methods for extendable surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811005.
- [12] Hu E Y, He Y M. Surface profile measurement of moving objects by using an improved  $\pi$  phase-shifting Fourier transform profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 57-61.
- [13] 吴周杰,张启灿.基于条纹投影的高速三维形貌测量技术发展综述[J].激光与光电子学进展,2023,60(8):0811001.  
Wu Z J, Zhang Q C. High-speed 3D topography measurement based on fringe projection: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811001.

- [14] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Sensor for in-motion continuous 3D shape measurement based on dual line-scan cameras[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1949.
- [15] Sun B, Yang L H, Guo Y, et al. A stereo line-scan system for 3D shape measurement of fast-moving objects [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10621: 106210A.
- [16] Lilienblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3-D surface reconstruction with a stereo line-scan system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(5): 1258-1266.
- [17] Denkena B, Huke P. Development of a high resolution pattern projection system using linescan cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7389: 73890F.
- [18] Liao R Y, Yang L H, Ma L Y, et al. A dense 3-D point cloud measurement based on 1-D background-normalized Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 5014412.
- [19] 白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1912-1925.  
Bai X F, Zhang Z H. 3D shape measurement based on colour fringe projection techniques[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1912-1925.
- [20] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency Selection[J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [21] 杨帆, 丁晓剑, 曹杰. 基于彩色结构光的自由曲面三维重建方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212001.  
Yang F, Ding X J, Cao J. 3D reconstruction of free-form surface based on color structured light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212001.
- [22] 张宗华, 连晓洁, 高楠. 彩色复合条纹投影测量系统串扰消除方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815005.  
Zhang Z H, Lian X J, Gao N. Crosstalk elimination method for color composite fringe projection measuring systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815005.
- [23] 边宸舒, 刘元坤, 于馨. 基于概率密度函数的彩色相位测量轮廓术校正[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0712002.  
Bian C S, Liu Y K, Yu X. Correction of color-encoded phase measurement profilometry based on probability density function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0712002.
- [24] 汤一平, 宗明理, 吴立娟. 基于双色反射模型的彩色结构光颜色识别的研究[J]. *计算机学报*, 2013, 36(9): 1908-1916.  
Tang Y P, Zong M L, Wu L J. Research on identification of color structured light based on dichromatic reflection model[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(9): 1908-1916.
- [25] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [26] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier Transform Profilometry ( $\mu$ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [27] Eineder M, Hubig M, Milcke B. Unwrapping large interferograms using the minimum cost flow algorithm [C]//*Sensing and Managing the Environment*. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, July 6-10, 1998, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 83-87.
- [28] Liao R Y, Zhu J G, Yang L H, et al. Flexible calibration method for line-scan cameras using a stereo target with hollow stripes[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 113: 6-13.