

基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法

李天雄, 侯茂盛*, 李丽娟, 刘涛, 史铮雪, 杨嘉亮

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出一种基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法,该方法依据各相邻点的曲率和法向量夹角划分待投影图形的特征区域和非特征区域,实现针对不同图形特征的投影控制点自适应分布。同时,为了保证投影图形控制点在稀释处理后的形状准确度,提出基于人眼空间分辨率的控制点数量稀释和优化方法。最后,将优化得到的投影图形控制点作为扫描投影点完成待投影图形轮廓的循环扫描投影。实验结果表明:将所提方法应用到激光扫描投影系统中,可使投影图形控制点数减少 20% 以上,有效解决了扫描投影复杂图形时的“闪烁”问题。

关键词 成像系统; 激光扫描投影; 图形闪烁; 稀释; 特征提取; 自适应

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2411004

Control Point Extraction and Optimization Method of Laser Scanning Projection Graphics Based on Feature Adaptation

Li Tianxiong, Hou Maosheng*, Li Lijuan, Liu Tao, Shi Zhengxue, Yang Jiali

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A control point extraction and optimization method for laser scanning projection graphics based on feature adaptation was proposed. It achieved the adaptive distribution of projection control points for different graphics features by dividing the feature region and non-feature region of the to-be-projected graphics according to the curvature of each adjacent point and the normal vector angle. Meanwhile, to ensure the shape accuracy of the projected graphics after projection control points were diluted, we also studied the dilution and optimization of the number of control points based on the spatial resolution of human eyes. Finally, the optimized control points of the projected graphics were used as the scanning projection points to complete the cyclic scanning projection of the to-be-projected graphics contour. The experimental results show that the proposed method, when applied to a laser scanning projection system, can reduce the number of projection control points by more than 20% and solve the “flicker” problem in the scanning projection of complex graphics.

Key words imaging system; laser scanning projection; graphics flicker; dilution; feature extraction; adaptation

OCIS codes 110.5100; 120.4640; 140.7300

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-06-06; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61805022)、吉林省自然科学基金(20200201229JC)、吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20200757KJ)

通信作者: *houmsh@cust.edu.cn

1 引言

现代先进制造装配业对精度、速度和效率都有较高要求。产品的快速生产、大规模定制和柔性制造是现代生产的中心主题。然而,大型复杂产品的现场装配过程仍大多由熟练技术人员手工完成,生产装配效率和产品质量水平无法完全满足现代制造业发展要求。激光扫描投影系统能够辅助操作人员进行零部件的精准定位和辅助装配等操作,能够大幅提高生产效率和制造装配精度,实现制造装配生产的数字化与智能化,现已广泛应用于先进制造企业。该系统能够依据待投影零部件的 CAD 数模文件,将数模中的三维坐标位置信息转换为扫描振镜的驱动控制电压,再驱动双轴振镜完成激光光束的快速偏折,从而将零部件外形轮廓以 1:1 的比例精确地投影到待装配定位区域,完成三维空间中零部件外形轮廓的精准投影,操作人员可依据上述投影的激光轮廓线完成数字化、高效精准的零部件定位和装配等操作^[1-3]。

本课题组在激光扫描投影技术的工业应用和仪器研发方面进行了深入研究,然而,在自主研发的过程中发现激光扫描投影系统在进行复杂轮廓线框图形投影时,扫描投影图形点过多,导致扫描投影图形的显示频率小于 20 Hz,从而产生“闪烁”现象,上述“闪烁”现象会严重影响零部件装配定位的准确度,拖慢装配工作进度,降低激光扫描投影系统在制造装配现场的实用价值。为解决上述问题,本课题组开展了基于时间补偿的激光扫描投影图形偏差校正研究,较好地抑制了投影过程中出现的拖尾、缺失现象,较大限度地降低了转角偏差,提高了投影图形的精度和清晰度^[4]。针对激光扫描投影路径的优化研究,实现了对激光扫描投影路径的优化,减少了扫描图像所需时间,在一定程度上改善了自主研制激光扫描投影系统的“图形闪烁”问题^[5]。但对于构成复杂且特征区域较多的投影图形,仅依靠优化扫描路径仍无法很好地解决“图形闪烁”问题。由于引起“闪烁”问题的关键是扫描频率低于 20 Hz,本文将频率作为主要研究参数,以 20 Hz 作为参数临界值分析扫描频率的影响因素,研究发现激光扫描投影系统振镜控制信号的采样速率与频率和投影点数有关,即采样速率为扫描频率和投影点数的乘积。采样速率属于投影系统参数,一般为定值,因此扫描频率和投影点数成反比关系。为了更进一步解决“图形闪烁”问题,需要从减少扫描投影图形点数量的角

度开展研究以提高扫描频率,而国内外针对图形特征点精简这一问题开展了很多研究工作,例如:2009 年周煜等^[6]针对海量散乱点云数据精简问题,提出了基于非均匀细分的精简算法,该方法对曲率变化明显的点云数据具有很好的实用性;2010 年周煜等^[7]针对大量散乱点云数据精简问题,提出了以平均曲率为判据的精简方法,较好地对曲率变化明显的点云数据实现了精简;2015 年陈西江等^[8]针对点云数据精简过程中的精度和速度问题,提出利用法向量夹角信息熵的点云简化方法,实现了简化精度和简化速度的平衡;2016 年 Yang 等^[9]针对三维点云特征的快速配准,提出一种局部特征统计直方图的特征描述符,该描述符具有较强的判别性、鲁棒性,从而实现了从粗到精的三维点云配准;2020 年高佳月等^[10]为了高效提取点云边界,提出一种基于边缘特征的自适应检测算法,解决了针对不同点云模型需要人工调参的问题。

综上所述,针对不同投影线框图形的特征提取和精简算法仍无法满足激光扫描投影系统中对图形特征的自适应提取和扫描图形点数量的精简优化要求。因此,本文提出一种基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法,该方法能有效缩短投影图形所需时间,提高扫描频率,降低“图形闪烁”现象的发生概率。

2 本文方法总体框架

所提出的基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法,即解析扫描投影控制点,并对控制点的数量和投影图形准确度进行优化。所提方法的整体流程如下:首先,对待投影零部件的投影轮廓线框进行提取,并对提取线框的初始化图形交换规范(IGES)文件进行解析,得到线框图形点三维坐标信息;然后,对得到的数据点进行 K 邻域搜索,计算出点的曲率和法向量信息;最后,利用计算得到的曲率和法向量设置特征判别参数,进行投影轮廓线框图形的特征区域划分,获取不同区域点的三维坐标,再引入人眼空间分辨率 12 lp/mm 作为数据点稀释过程中的判断条件,对不同区域的数据点进行稀释处理,并将稀释后的点作为投影图形的“控制点”进行投影,实现更进一步缩短扫描投影图形所需时间,提高投影图形显示频率,降低“图形闪烁”现象发生概率,并且保证投影图形位置、形状准确度以及投影图形显示效果的目的。本文方法的流程如图 1 所示。

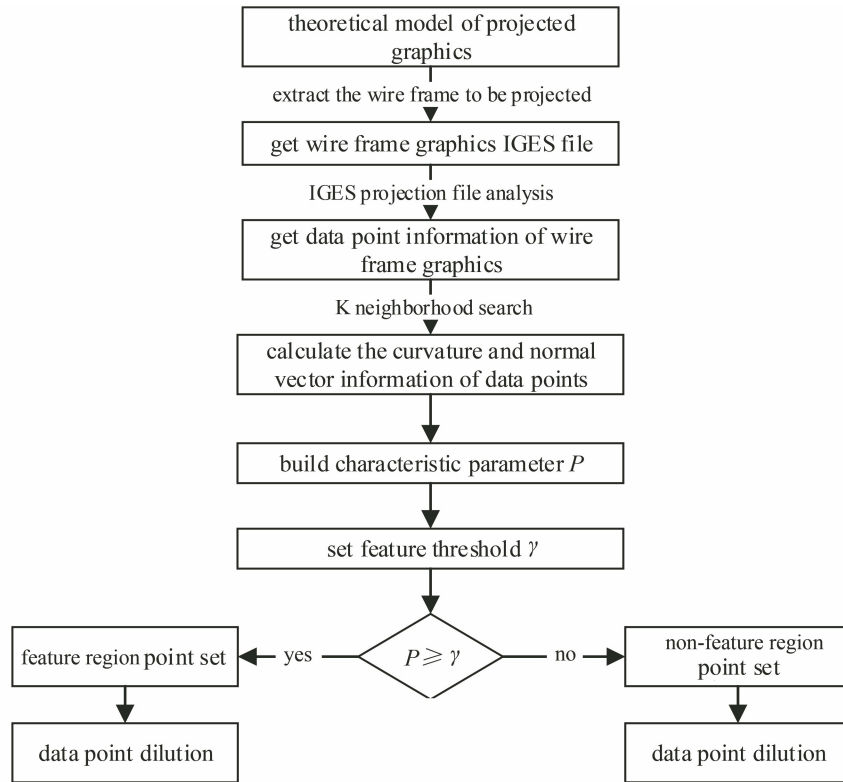


图 1 本文方法的整体流程图
Fig. 1 Overall flow chart of proposed method

3 投影图形的解析

IGES 文件是目前使用最广的产品数据交换规范。激光扫描投影系统可以通过 IGES 文件解析出点的三维坐标信息,从而实现轮廓线框图形的逐位置点循环扫描投影。其中,B 样条曲线是表征复杂图形特征的广泛应用形式,也是 IGES 文件中最复杂的特征形式,因此本实验以 B 样条曲线为例,开展控制点提取和优化方法的研究。

B 样条曲线定义为

$$p(u) = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,k}(u), \quad (1)$$

式中: $d_i (i=0,1,\dots,n)$ 为 B 样条曲线的控制顶点; $N_{i,k}(u) (i=0,1,\dots,n)$ 为 B 样条曲线的一组基函数, u 表示节点矢量的非递减参数。控制点顺序相连可以得到该 B 样条曲线的控制多边形。

B 样条曲线的基函数为

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u < u_{i+1} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases}, \quad (2)$$

通过对 B 样条曲线 IGES 文件的解析可以得到样条线的控制点,即(1)式中的 d_i 。

图 2 所示为利用 CAD 软件绘制的一条 B 样条曲线。

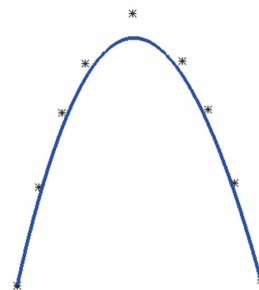


图 2 利用 CAD 软件绘制的 B 样条曲线
Fig. 2 B-spline curve drawn by CAD software

在已知 B 样条曲线定义式、B 样条曲线基函数式和通过解析曲线的 IGES 文件得到的 B 样条曲线控制顶点坐标情况下,通过在 B 样条曲线定义域内进行等间隔取值来得到 B 样条曲线上点的三维坐标。表 1 所示为在 B 样条曲线定义域内以 0.1 为间隔获取的 10 个投影点的三维坐标。

基于上述方法解析得到的数据点坐标是通过均匀取点方式完成的。该方法只能按照数量进行取点,而不能根据投影图形的特征和精度进行取点,取

点数量过少会影响精度,取点数量过多会出现图形闪烁现象。本研究针对上述解析方法的不足,提出

一种基于特征自适应的扫描投影图形控制点提取及优化方法。

表 1 B 样条曲线上三维坐标点的解析结果

Table 1 Analysis results of three-dimensional coordinate point in the B-spline curve

Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x / mm	0	6.68	14.48	24.23	38.54	61.46	75.77	85.52	93.32	100
y / mm	0	24.94	49.54	73.43	94.75	94.75	73.43	49.54	24.93	0
z / mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4 基于几何参数信息的特征区域划分

4.1 几何参数信息计算

曲率是重要的几何特征之一,它表征曲线的弯曲程度,曲率越大,投影曲线的弯曲程度越大,曲率越小,则投影曲线越平缓。因此,可以利用曲率这一特性来判断投影图形的特征与非特征区域。

为了计算曲线上各数据点的曲率,设 g_i 为解析得到的投影曲线上 N 个数据点的集合 $G = \{g_i(x_i, y_i, z_i) | i=1, 2, 3, \dots, N\}$ 中的一点,用 g_{ij} 表示第 i 点的第 j 个邻域点,则 g_i 点的 K 个邻域点集表示为 $\{g_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) | j=1, 2, 3, \dots, K\}$,邻域的重心可以表示为

$$\sigma_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K g_{ij}, \quad (3)$$

则利用 g_i 点的三维坐标和该点的邻域重心 σ_i 构建协方差矩阵 $T_i^{[11]}$:

$$T_i = \begin{bmatrix} g_{i1} - \sigma_i \\ g_{i2} - \sigma_i \\ g_{i3} - \sigma_i \\ \vdots \\ g_{iK} - \sigma_i \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} g_{i1} - \sigma_i \\ g_{i2} - \sigma_i \\ g_{i3} - \sigma_i \\ \vdots \\ g_{iK} - \sigma_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

协方差矩阵 T_i 为半正定的对称矩阵,它定义了点的局部几何信息。求解出协方差矩阵 T_i 的特征值,对于三维数据点会得到三个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$,而二维数据点会得到两个特征值 λ_1, λ_2 ,并取其中最小特征值 λ_1 ,则数据点 g_i 处的曲率 t_i 可以表示为

$$t_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad \text{or} \quad t_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (5)$$

法向量是垂直于曲线上一点切线的直线,而法向量之间的夹角能够表征曲线的凹凸程度。对于曲线非特征的平缓区域,法向量之间的夹角较小;而对于曲线变化剧烈的特征区域,法向量之间的夹角较大。因此,可以利用法向量的这一特性来判断图形的特征与非特征区域。

为了计算数据点的法向量,计算协方差矩阵并

求解矩阵的最小特征值 λ_1 对应的特征向量 n_1 ,并将其作为所求数据点的法向量。若数据点 g_1 和 g_2 的法向量分别为 n_1 和 n_2 ,则法向量之间的夹角可以表示为

$$\theta_{g_1 g_2} = \arccos\left(\frac{n_{g_1} \cdot n_{g_2}}{|n_{g_1}| \times |n_{g_2}|}\right), \quad (6)$$

式中: $\theta_{g_1 g_2}$ 表示点 g_1 和 g_2 的法向量夹角; $|\cdot|$ 表示取模。夹角 θ 的取值范围为 $[0, \pi]$ 。对 g_1 点与其 K 邻域内所有点的法向量夹角求和,得到夹角参数 $\omega(g_i)$ 为

$$\omega(g_i) = \sum_{j=1}^K \theta_{g_i g_{ij}}. \quad (7)$$

4.2 特征区域划分

数据点的曲率和法向量间的夹角都可以用来判断所提取区域是否为图形的特征区域。基于这一特性,定义特征判别参数 $p(g_i)$ 。特征点所在的特征区域曲线变化相对剧烈,曲率 t_i 和法向量夹角 $\omega(g_i)$ 的值较大,且特征判别参数 $p(g_i)$ 与曲率 t_i 、法向量夹角值 $\omega(g_i)$ 成正比。使用两个参数来共同判断特征可以避免使用单一参数的局限性。因此,特征判别参数 $p(g_i)$ 可以表示为

$$p(g_i) = \lambda_t t_i + \lambda_\omega \omega(g_i), \quad (8)$$

式中: λ_t 为曲率调节系数,本文取 $\lambda_t = 30$; λ_ω 为夹角调节系数,本文取 $\lambda_\omega = 10$ 。调节系数的取值范围一般为 $10 \sim 30^{[12]}$ 。

由此可以进行特征点的提取:

$$\begin{cases} g_i \in \alpha, & \text{if } p(g_i) \geq \gamma \\ g_i \in \beta, & \text{if } p(g_i) < \gamma \end{cases}, \quad (9)$$

特征阈值 γ 的计算公式为

$$\gamma = \sum_{i=1}^N p(g_i) / N, \quad (10)$$

式中: N 表示集合中点的数量。

若某个数据点的特征判别参数 $p(g_i) \geq \gamma$,则该点被判定为特征点,计入集合 α ;若某个数据点的特征判别参数 $p(g_i) < \gamma$,则该点被判定为非特征点,计入集合 β 。通过上述计算可以将解析得到的数据

点划分到特征点集 α 与非特征点集 β , 这为后续数据点稀释处理做好准备。对图 3(a) 所示曲线进行

上述处理, 可区分出曲线的非特征点集和特征点集, 分别如图 3(b) 和图 3(c) 所示。

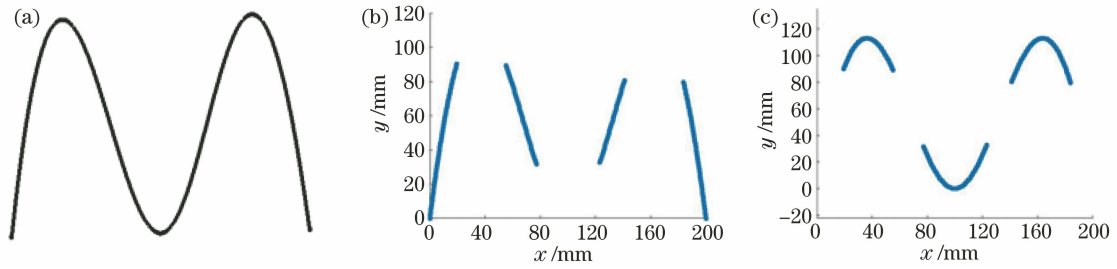


图 3 投影图形特征区域划分。(a) 投影曲线理论数模; (b) 非特征点集; (c) 特征点集

Fig. 3 Projection graph feature regional division. (a) Theoretical model of projection curve; (b) non-feature point set; (c) feature point set

5 基于人眼空间分辨率的数据点稀释

利用上述曲率和法向量特征参数判别方法, 实现了对投影线框图形点的区域划分, 得到特征点与非特征点两组数据点集。而在激光扫描投影仪器中, 相邻两点之间的扫描沿着直线进行, 整条投影曲线可以看作是由若干条线段逼近的投影图形。为了获得更好的激光扫描投影显示效果, 还需要对点集 α 和点集 β 中的数据点数量进行稀释优化, 从而既能满足投影图形的位置和形状准确度, 又可达预期的投影图形显示效果, 使得激光扫描投影仪器能够降低“图形闪烁”现象的发生概率。

在稀释的过程中, 引入人眼空间分辨率 12 lp/mm 作为稀释停止的判断依据, 即在 1 mm 的尺度下, 人眼最多只能分辨 12 对线。因此, 利用直线段逼近曲线时, 需要保证直线与曲线的间隔小于 0.083 mm, 才不会在实际的辅助装配与定位操作应用中产生定位偏差。

稀释过程中使用 n 个点为间隔分别对 α 和 β 点集进行取点稀释, n 的初值设置为 1, 步长为 1, 改变 n 的取值, 并计算每个被稀释的点到相应直线的距离 d , 当 $d < 0.083$ mm, 则满足人眼线对误差, 说明这段曲线可以用相应的直线表示。如图 4 所示, 通过计算距离 d 来判断曲线是否可以用直线表示。

如图 4 所示, $a(x_a, y_a, z_a)$ 、 $b(x_b, y_b, z_b)$ 、 $e(x_e, y_e, z_e)$ 三点为从曲线上解析得到的点, 若要判断是否可以用线段 ab 表示弧线 \widehat{aeb} , 则计算点 e 到线段 ab 的距离 $d < 0.083$ mm 是否成立。 d 的计算公式为

$$d = \frac{|(e - a) \times (b - a)|}{|b - a|} \quad (11)$$

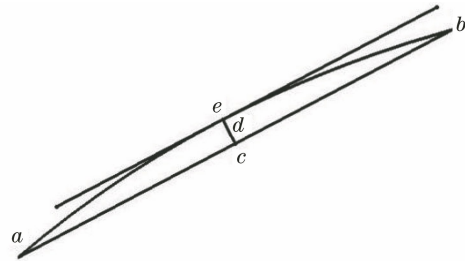


图 4 被稀释点到相应直线的距离 d

Fig. 4 Distance d from the point to be diluted to the corresponding straight line

依据(11)式循环计算出稀释间隔 n 的最大值, 实现用最少的点来表示投影图形的精准形状, 且对应的偏差 d 满足人眼空间分辨率 12 lp/mm 的极限判据, 从而提高扫描投影图形的显示频率, 避免投影点数量过多导致投影图形产生“闪烁”现象, 提高激光扫描投影仪器在零部件实际装配定位操作中的准确度。稀释流程如图 5 所示。

6 实验结果与分析

在工业应用中对激光投影精度和质量的要求较高, 通常要求激光线宽不超过 0.5 mm 且亮度尽量均匀。如图 6(a) 所示, 为了验证本文方法的有效性并分析投影显示效果, 选取实验板上的 4 条投影曲线作为验证目标, 各曲线由 0.5 mm 宽度的线槽刻画而成, 利用自主研发的激光扫描投影系统[图 6 (b)]进行投影实验。该系统由激光器、准直扩束器模块、动态聚焦模块、二维振镜、探测模块、信息采集模块组成。其中, 准直扩束和动态聚焦模块可以使激光器发射的激光在待投影区域实现精确聚焦。探测和信息采集模块用于投影前的标定工作, 根据采集到的信息标定出激光器与待投影区域的相对位置, 并解算出坐标转换关系, 将投影点的三维坐标从

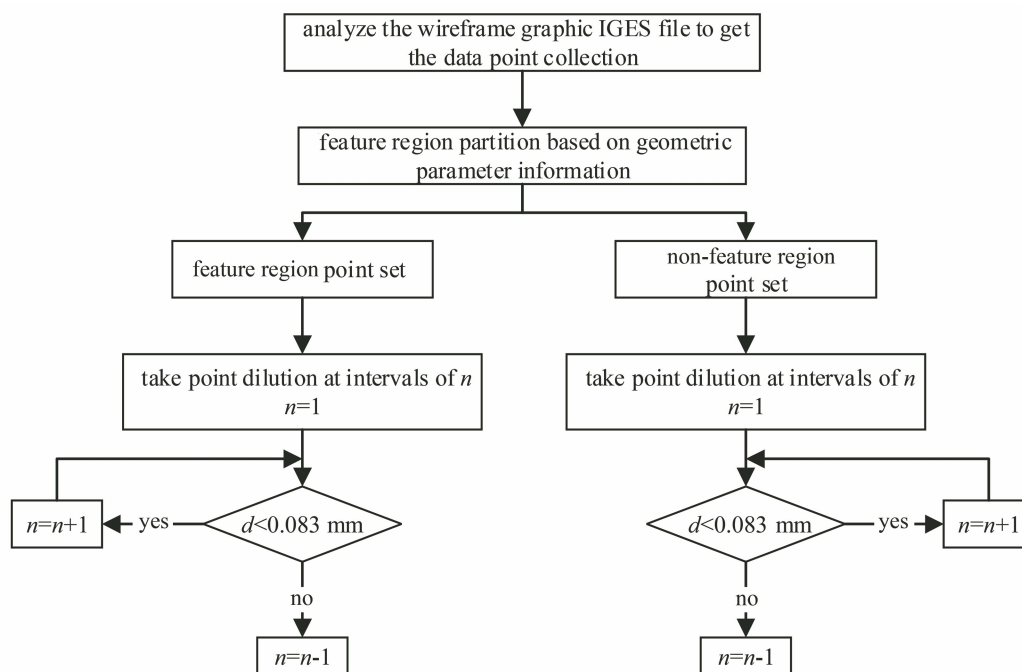


图 5 基于人眼空间分辨率的数据点稀释流程

Fig. 5 Data point dilution process based on the spatial resolution of the human eye

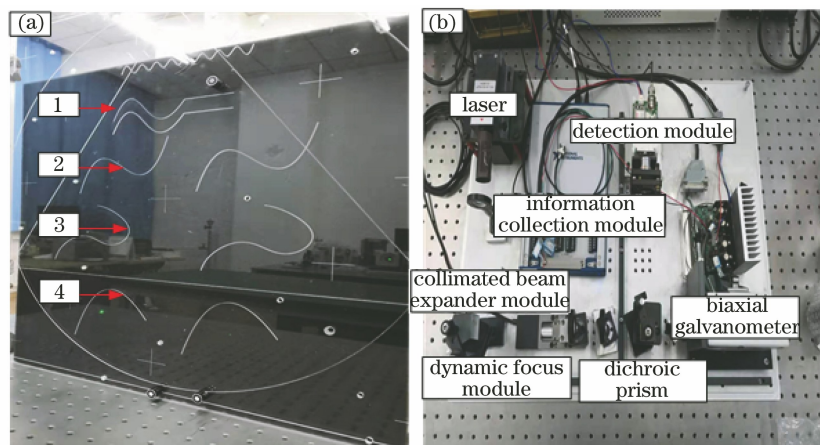


图 6 投影实验器件。(a)投影实验板;(b)自主研发的激光扫描投影系统

Fig. 6 Projection experimental device. (a) Projection experiment board; (b) self-developed laser scanning projection system

理论坐标系转换到投影坐标系。自主研发系统的采集方式为模拟控制方式,通过多功能数据采集卡将转换后的三维坐标值转化为电压值,并向双轴扫描振镜发送相应幅值和频率的电压信号,完成激光光束的偏转和扫描。同时,自主研发系统中采用现行数字振镜通用的 XY2-100 通信协议,双轴振镜的同步时钟信号频率为 2 MHz。此外,激光扫描线宽大于 0.2 mm,投影图形位置准确度可达 0.5 mm,投影 5 行 5 列棋盘格图形无“闪烁”现象,扫描投影图形的显示频率约 30 Hz,能够解析 DXF、DWG、IGES 格式的 CAD 数模文件。

选取的 4 条待投影曲线包含特征和非特征区

域,且具有连续特征,具备验证本文方法的条件。首先,在其 CAD 理论数模中提取待投影曲线,如图 6(a)中所标注的 4 条曲线。将提取的曲线分别保存成 IGES 格式文件,并对其进行解析处理,得到未经过优化处理的曲线上点的三维坐标信息。然后,利用所提出的优化方法对上述解析获取的点进行优化处理,优化结果如表 2 所示。将所提方法的优化结果与弦高压缩算法^[13]、法向向量压缩算法^[7]、曲率压缩算法^[6]进行比较,结果如表 3 所示。为了方便比较,解析的初始数据点数均设置为 1000,且自主研发激光扫描投影系统的采样速率为 3800 Sa/s。

表 2 本文算法对不同模型的精简结果

Table 2 Condensed results of the proposed algorithm for different models

Model No.	M1	M2	M3	M4
Number of initial data points	1000	1000	1000	1000
Dilution result	42	47	55	33
Dilution ratio /%	95.8	95.3	94.5	96.7
Scanning frequency /Hz	90.5	80.9	69.1	115.2

表 3 不同算法的稀释结果及精简比

Table 3 Dilution results and reduction ratios of different algorithms

Algorithm	M1		M2		M3		M4	
	Dilution result	Dilution ratio /%	Dilution result	Dilution ratio /%	Dilution result	Dilution ratio /%	Dilution result	Dilution ratio /%
Chord height compression algorithm	57	94.3	60	94	73	92.7	43	95.7
Normal vector compression algorithm	72	92.8	78	92.2	112	88.8	67	93.3
Curvature compression algorithm	285	71.5	294	70.6	324	67.6	292	70.8

从表 2 可以看出,本文方法的优化效果明显,且扫描频率均大于 20 Hz。对比表 2 和表 3 可以看到,利用本文方法可以获得更好的优化效果,相较于另外几种方法中优化结果最好的弦高压缩算法,本文方法的投影图形控制点数量减少了 20% 以上。

为了验证自主研制的激光扫描投影系统的投影精度,对 4 条曲线进行单独投影。由于经过本文方法优化后得到的投影点三维坐标信息是在理论数模坐标系下的坐标值,在进行投影前需要将其转化到投影坐标系中。如图 6(a) 所示,在投影板上设置了 6 个靶标点,靶标点表面可以使光原路返回,投影前手动调整激光光点位置,将其分别投影到 6 个靶标

点位置并扫描,通过采集反射回的光强信息,解算出靶标点中心在投影坐标系下的三维坐标,并利用 6 个点在理论数模坐标系下和投影坐标系下的两组三维坐标进行坐标转换计算,得到旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。利用计算得到的 R 、 T 矩阵即可将优化后的投影点三维坐标转换到投影坐标系中。自主研制激光扫描投影系统可将转换后的三维坐标信息转变为电压值,并以此驱动双轴振镜工作,使激光光束发生快速偏折,在目标区域扫描投影出零部件的外形轮廓。分别对图 6 中的 4 条曲线进行投影实验,投影效果如图 7~10 所示,其中图 7(a)~10(a) 为待投影曲线的 CAD 数模图,图 7(b)~10(b) 和

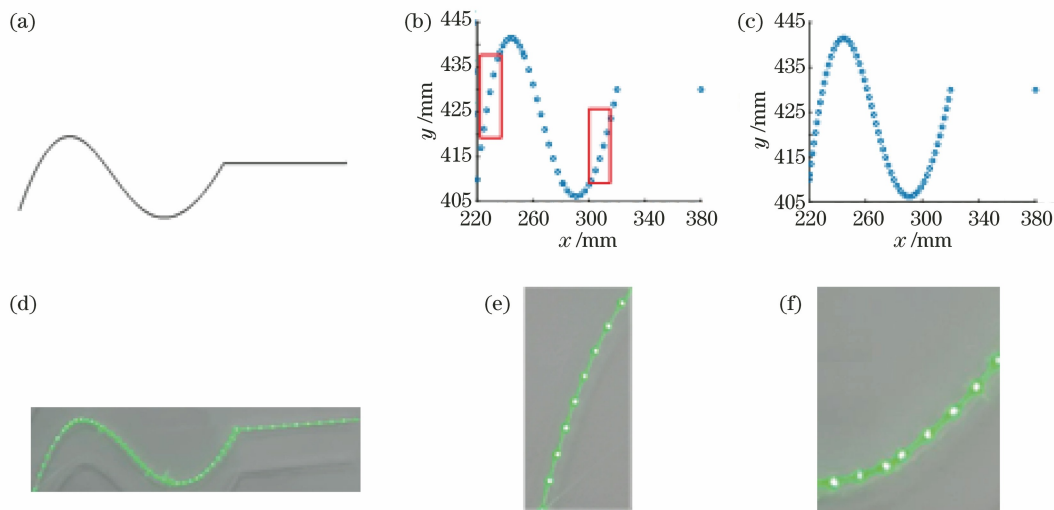


图 7 M1 曲线的优化和投影结果。(a) M1 曲线理论数模;(b)本文优化方法仿真结果;
(c)弦高压缩优化方法仿真结果;(d)本文优化方法投影结果;(e)(f)图 7(b)框选处的细节

Fig. 7 Optimization and projection results of M1 curve. (a) Theory digital model of M1 curve; (b) simulation result of the proposed optimization method; (c) simulation result of chord height compression algorithm; (d) projection result of the proposed optimization method; (e)(f) detailed drawings of the frames in Fig. 7(b)

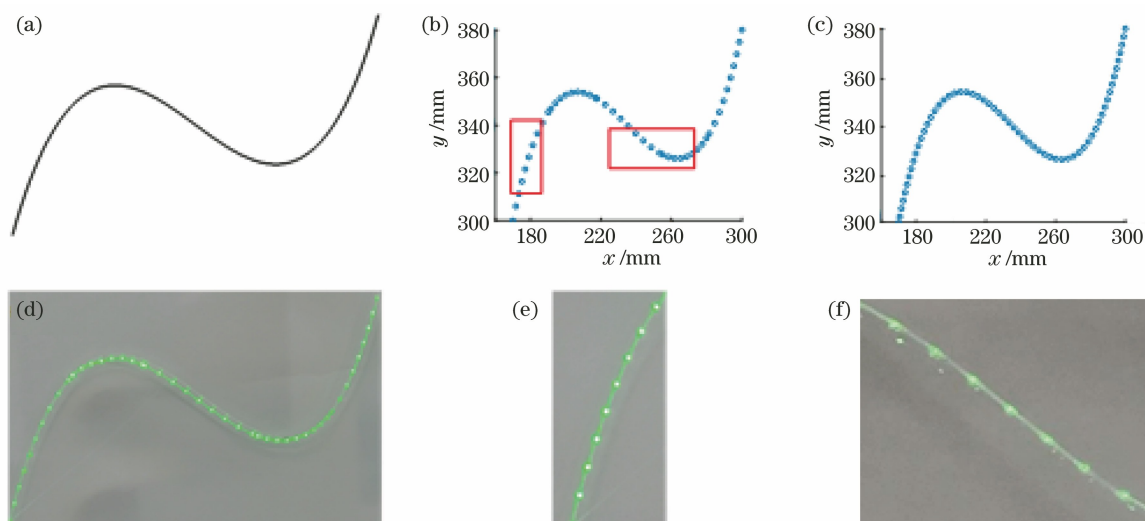


图 8 M2 曲线的优化和投影结果。(a) M2 曲线理论数模;(b)本文优化方法仿真结果;
(c)弦高压缩优化方法结果;(d)本文优化方法投影结果;(e)(f)图 8(b)框选处的细节

Fig. 8 Optimization and projection results of M2 curve. (a) Theory digital model of M2 curve; (b) simulation result of the proposed optimization method; (c) simulation result of chord height compression algorithm; (d) projection result of the proposed optimization method; (e)(f) detailed drawings of the frames in Fig. 8(b)

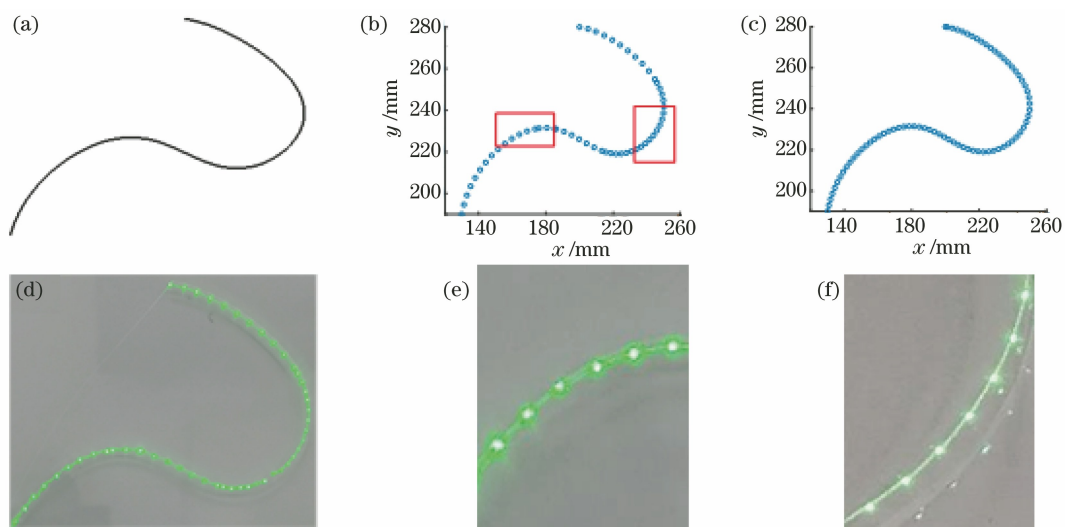


图 9 M3 曲线的优化和投影结果。(a) M3 曲线理论数模;(b)本文优化方法仿真结果;
(c)弦高压缩优化方法结果;(d)本文优化方法投影结果;(e)(f)图 9(b)框选处的细节

Fig. 9 Optimization and projection results of M3 curve. (a) Theory digital model of M3 curve; (b) simulation result of the proposed optimization method; (c) simulation result of chord height compression algorithm; (d) projection result of the proposed optimization method; (e)(f) detailed drawings of the frames in Fig. 9(b)

图 7(d)~10(d)为利用基于特征自适应的投影图形控制点提取方法处理后的仿真图和投影效果图,图 7(c)~10(c)为利用弦高压缩算法优化后的仿真图。可以看出,本文方法的处理效果更好,投影点数更少,且在后续复杂线框图形投影分析时没有出现“图形闪烁”现象,并且在特征区域投影点密集,非特征区域投影点稀疏。图 7(e)~10(e)和图 7(f)~10(f)为图 7(b)~10(b)中框选处的局部细节图,可观察

到光斑均投影到曲线的 0.5 mm 线槽中。由此可见,自主研发的激光扫描投影系统精度满足工业要求。

为了进一步验证本文方法对复杂线框图形控制点提取及优化的有效性,比较本文方法和上述另几种方法中优化结果最好的弦高压缩算法对 4 条投影曲线进行优化后的投影结果,选取图 6(a)所示的 4 条曲线同时投影并验证投影效果。该投影图形具有

扫描路径复杂,扫描点数多,扫描范围大,图形特征多的特点。观察本文方法和弦高压缩算法优化后的

投影效果,比较投影图形的位置准确度和投影图形显示效果,如图 11 所示。

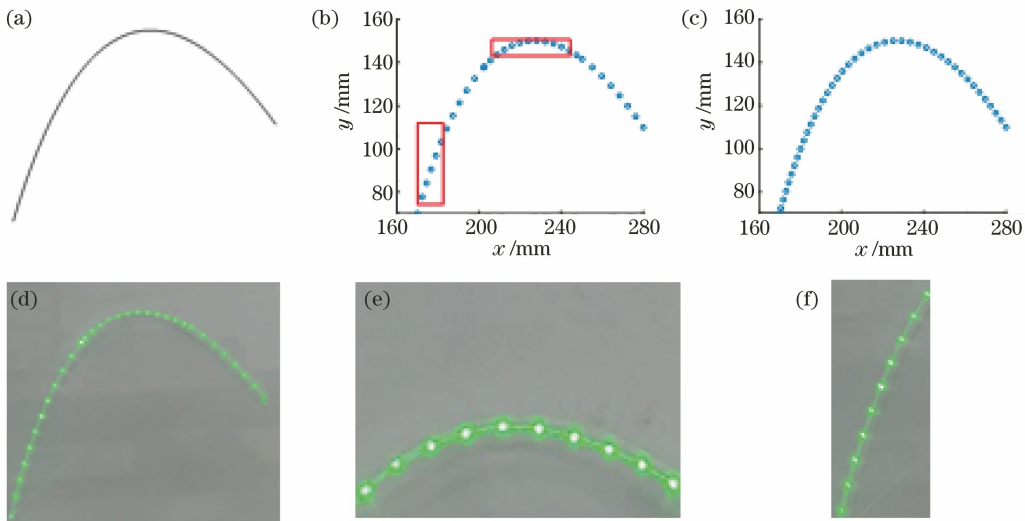


图 10 M4 曲线的优化和投影结果。(a) M4 曲线理论数模;(b)本文优化方法仿真结果;

(c)弦高压缩优化方法结果;(d)本文优化方法投影结果;(e)(f)图 10(b)框选处的细节

Fig. 10 Optimization and projection results of M4 curve. (a) Theory digital model of M4 curve; (b) simulation result of the proposed optimization method; (c) simulation result of chord height compression algorithm; (d) projection result of the proposed optimization method; (e)(f) detailed drawings of the frames in Fig. 10(b)

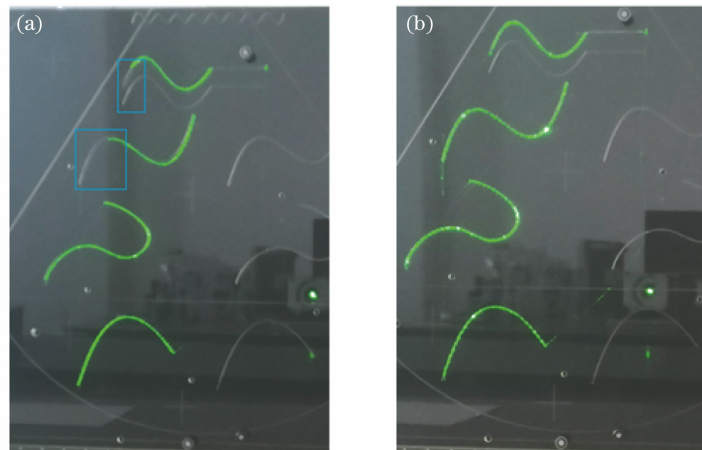


图 11 不同方法的复杂线框曲线投影效果。(a)弦高压缩法;(b)本文方法

Fig. 11 Projection effects of complex curves by different methods. (a) Chord height compression algorithm; (b) proposed method

通过投影效果分析:当投影控制点数量过多时,扫描时间过长,导致扫描频率降低,出现投影图形“闪烁”现象,对投影图形进行拍照时会出现投影图形缺失。图 11(b)所示为利用所提出的特征自适应投影图形控制点提取方法进行优化后的投影效果。可以看到,投影图形显示完整,亮度均匀,且光斑均入射到 0.5 mm 宽的线槽中,投影图形具有较高的位置准确度和较好的显示效果。图

11(a)所示为利用弦高压缩算法进行优化后的投影效果,由于显示频率降低,投影图形显示不完整,导致方框内存在投影图形缺失,出现“图形闪烁”现象。

采用定量分析方法对比上述两种优化方法得出的扫描投影图形显示频率,如表 4 所示。对比实验过程中自主研发激光扫描投影系统的采样速率为 3800 Sa/s。

表 4 两种优化方法的数据对比
Table 4 Data comparison of two optimization methods

Method	Sampling rate / (Sa · s ⁻¹)	Number of control points	Scanning frequency / Hz
Chord height compression algorithm	3800	233	16.3
Proposed method	3800	177	21.5

从表 4 可以看到:利用本文方法可减少投影图形控制点的数量,提高扫描频率,缩短扫描时间,消除“图形闪烁”现象,达到预期效果;利用弦高压缩算法优化后的扫描频率为 16.3 Hz,与闪烁临界值 20 Hz 相差 20%左右,与图 11(a)中由闪烁现象引起图像缺失的部分占整幅图形的比例基本一致。

为进一步验证本文方法的有效性和普适性,

将本文方法应用到美国 FARO 公司生产的激光扫描投影系统并验证优化结果。图 12(a)所示为 FARO 激光扫描投影仪,图 12(b)所示为利用本文方法将优化后的点应用到 FARO 激光扫描投影仪上的投影效果,其投影图形显示完整,并未出现“闪烁”现象。图 12(c)所示为使用未经过优化处理的点进行投影的显示效果,在方框处出现图形缺失现象,表明该投影图形出现了“闪烁”。

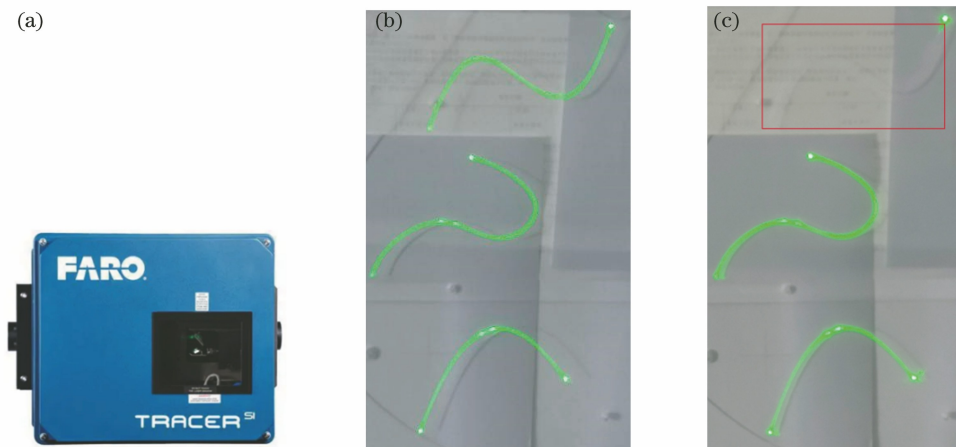


图 12 应用本文方法优化 FARO 投影系统前后的投影效果。(a) FARO 投影仪;(b)优化后的投影;(c)优化前的投影
Fig. 12 Projection effects before and after the optimization of the FARO projection system by the proposed method.

(a) FARO laser projector; (b) optimized projection; (c) unoptimized projection

为了进一步验证本文方法的应用广泛性,选取两个三维零部件进行投影实验,零部件中包含曲线、多边形、三角形、圆形等特征。分别将其投影到平面和曲面上,实验结果如图 13 和图 14 所示。可以看

到:投影图形显示完整,亮度均匀,零部件位置准确;投影图像中并没有出现图形缺失的情况,证明投影结果并没有产生图形闪烁,更进一步验证了本文方法同样适用于三维零部件的轮廓线框投影。

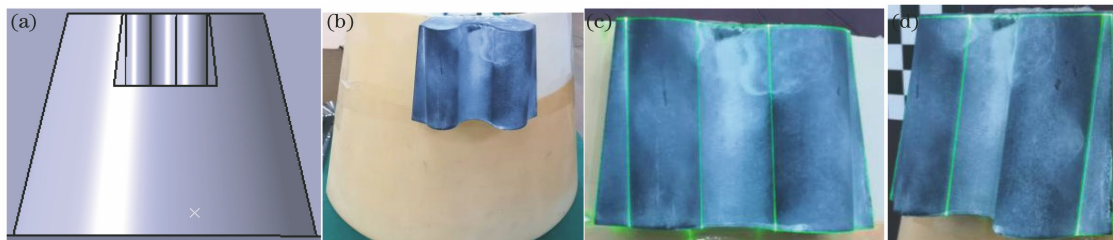


图 13 自主研发的扫描投影系统针对三维图形的曲面投影效果。(a)理论数模;(b)实物图;(c)投影正视图;(d)投影侧视图
Fig. 13 Curved surface projection effects of 3D graphics using the self-developed scanning projection system.

(a) Theoretical model; (b) physical map; (c) front view of projection; (d) side view of projection

7 结 论

提出一种基于特征自适应的激光扫描投影图形

控制点提取及优化方法。首先,提取待投影零部件的投影线框,并对投影线框的 IGES 文件进行解析,得到线框数据点的三维坐标信息。然后,依据各相

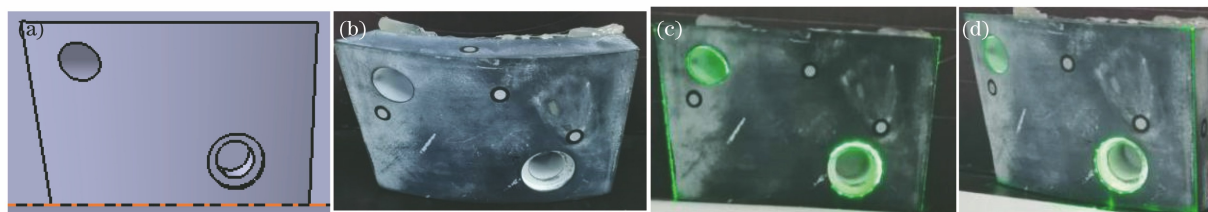


图 14 自主研制的扫描投影系统针对三维图形的平面投影效果。(a)理论数模;(b)实物图;(c)投影正视图;(d)投影侧视图

Fig. 14 Plane projection effects of 3D graphics using the self-developed scanning projection system.

(a) Theoretical model; (b) physical map; (c) front view of projection; (d) side view of projection

邻点的曲率和法向量夹角划分待投影图形的特征区域和非特征区域,实现针对不同图形特征的投影控制点自适应分布。同时,为了保证投影图形控制点在稀释处理后的形状准确度,又研究了基于人眼空间分辨率的控制点数量稀释和优化方法。最后,将优化得到的投影图形控制点作为扫描投影点完成待投影图形轮廓的循环扫描投影。通过与不同的点稀释方法——弦高压缩算法、法向矢量压缩算法、曲率压缩算法进行对比,发现利用本文方法可以使投影图形控制点数量减少 20% 以上,扫描频率提高了 20% 以上,缩短了扫描时间,较好地抑制了“图形闪烁”现象,投影结果可以满足投影图形的位置、形状准确度要求,并具有更好的图形显示效果。将本文方法应用到自主研制的激光扫描投影系统中,能够提升自主研发激光扫描投影系统的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ilchev S, Andreev R, Ilcheva Z. Display of computer-generated vector data by a laser projector [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies '20, June 19-20, Ruse, Bulgaria. New York: ACM, 2020: 11-18.
- [2] Ilchev S, Ilcheva Z, Andreev R, et al. Computer-aided laser projection system for flexible manufacturing [C]//2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS), August 28-30, 2020, Varna, Bulgaria. New York: IEEE Press, 2020: 568-573.
- [3] Yi Y, Liu X J, Ni Z H. Digital twin-based human-machine collaboration and application approach for laser projection aided assembly of complex product [C]//2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), August 22-23, 2020, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2020, 2: 100-103.
- [4] Hou M S, Chen Y Q, Liu D L, et al. Deviation correction of laser scanning projection image based on time compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0411002.
- [5] Hou M S, Sun M L, Yang F, et al. Research on path optimization method of laser scanning projection based on improved Fleury algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 493-499.
- [6] Zhou Y, Lei Y, Du F R, et al. Algorithm of scattered point cloud data reduction based on non-uniform subdivision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 193-196, 219.
- [7] Zhou Y, Zhang W B, Du F R, et al. Algorithm for reduction of scattered point cloud data based on curvature[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(7): 785-789.
- [8] Chen X J, Zhang G, Hua X H. Point cloud simplification based on the information entropy of normal vector angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0814003.
- [9] Yang J Q, Cao Z G, Zhang Q. A fast and robust local descriptor for 3D point cloud registration[J]. Information Sciences, 2016, 346/347: 163-179.
- [10] Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604003.

- 述子的自适应边缘检测算法[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604003.
- [11] Li X C, Yan Z Y, Lin S, et al. Point cloud registration based on neighborhood characteristic point extraction and matching [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0415001.
李新春, 闫振宇, 林森, 等. 基于邻域特征点提取和匹配的点云配准 [J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0415001.
- [12] Wang L H, Yuan B Z. Feature point detection for 3D scattered point cloud model [J]. Signal Processing, 2011, 27(6): 932-938.
王丽辉, 袁保宗. 三维散乱点云模型的特征点检测 [J]. 信号处理, 2011, 27(6): 932-938.
- [13] Fang F, Cheng X J. A fast data reduction method for massive scattered point clouds based on slicing [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(11): 1353-1357.
方芳, 程效军. 海量散乱点云快速压缩算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1353-1357.