

引文格式: 潘高健, 张尚安, 张政宇, 等. 面向HUD 高保真虚拟装配的零件曲面特征高精度快速拟合方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 82-93.

PAN Gaojian, ZHANG Shangan, ZHANG Zhengyu, et al. High-precision fast fitting method for part surface features in HUD-oriented high-fidelity virtual assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 82-93.

面向 HUD 高保真虚拟装配的零件曲面特征 高精度快速拟合方法*

潘高健¹, 张尚安², 张政宇¹, 候国义¹, 李泷杲¹, 王书春¹, 黄翔¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 针对汽车、飞机抬头显示设备(Head-up display, HUD)高保真虚拟装配中零部件曲面类特征高精度的快速拟合需求, 提出一种面向蓝光散乱点云的处理与拟合方法。首先, 采用K近邻的点云复合滤波方法去除噪声点与冗余点; 其次, 基于非均匀有理B样条(Non-uniform rational B-splines, NURBS)曲面快速基面构建与迭代优化拟合方法对滤波后的点云进行内部曲面快速拟合; 最后, 基于滚球算法进行点云边界提取及曲面裁剪, 以获取准确反映点云边界信息的高精度曲面特征。设计加工HUD系统成套标准件, 获取主反射镜蓝光点云, 开展拟合精度与效率评价试验, 将本文方法、商业软件方法和文献方法拟合曲面分别与三坐标获取的表面数据进行对比, 可知本文方法可在拟合效率明显提升的前提下达到 μm 级的拟合精度, 满足高保真虚拟装配的技术需求。

关键词: 散乱点云; 点云去噪; 自由曲面; 高精度拟合; 点云边界识别

中图分类号: V262.4+1

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.12.082

High-Precision Fast Fitting Method for Part Surface Features in HUD-Oriented High-Fidelity Virtual Assembly

PAN Gaojian¹, ZHANG Shangan², ZHANG Zhengyu¹, HOU Guoyi¹,

LI Shuanggao¹, WANG Shuchun¹, HUANG Xiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirement of high precision and fast fitting of surface features of parts in high-fidelity virtual assembly of head-up display (HUD) devices of automobiles and aircraft, a blue-ray random point cloud processing and fitting method is proposed. Firstly, the K-nearest neighbor point cloud combination filtering method is used to remove noise points and redundant points. Secondly, the internal surface of the filtered point cloud is quickly fitted based on the fast base surface construction and iterative optimization fitting method of non-uniform rational B-splines (NURBS). Finally, the point cloud boundary extraction and surface cutting are carried out based on the rolling ball algorithm to obtain high-precision surface features which could accurately reflect the point cloud boundary information. A complete set of HUD system standard parts was designed and processed, and the blue-ray point cloud of the main mirror was obtained to carry out fitting accuracy and efficiency evaluation experiments. By comparing the fitting surfaces of the proposed method, commercial software method and literature method with the surface data obtained by three coordinates accordingly, it can be concluded that the proposed method can achieve micron fitting accuracy on the premise of significantly improved fitting

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2020605C014); 江苏省卓越博士后计划(2022ZB217)。

efficiency, and can meet the technical requirements of high-fidelity virtual assembly.

Keywords: Scattered point cloud; Point cloud denoising; Free-form surface; High-precision fitting; Point cloud boundary identification

作为常见飞机辅助驾驶设备,抬头显示设备(Head-up display, HUD)凭借其优异的信息投影显示功能逐步应用于中高端汽车领域。如图1(a)所示,HUD系统通过光学镜面组成光路,将速度等信息投影于飞机或汽车的挡风玻璃处以辅助驾驶。HUD系统结构紧凑、零部件众多、装配关系复杂、内部光路精度要求高。随着HUD显示区域增加、可视化锥角增大及汽车量产等性能与生产需求的提出,传统的“人工随机装配+逐台测试”的方式变得难以满足其超高的精度与效率要求,同时,人工装配质量不稳定,HUD产品成像质量差、内部光路超差等问题频繁出现,实际装配中需要反复拆装才可达标。其原因在于,当前粗犷式装配方法缺乏装配前制造偏差分析、装配中误差积累与传递规律研究,无法在生产成本和加工精度不稳定的约束下,通过精准定位超差零件、二次分拣相关零部件等途径提高产品的一次装配成功率。

作为面向复杂高精度系统的新兴技术,实测模型驱动的高保真虚拟装配涉及高精度点云数据获取、装配-性能特征识别重构、基于重构特征的可装配性分析等内容^[1]。该技术的核心在于通过高精度拟合方法将装配与性能特征进行重构以表征制造偏差,而后基于实测模型开展带偏差装配^[2],厘清装配误差累积规律,通过零件影响度分析、二次分拣等手段提高产品的一次装配成功率。HUD作为典型高精度多装配层级产品,其性能高度依赖于内部光路装配精度,导致其装配难度与成本居高不下,而高保真虚拟装配的出现使得基于零件制造误差分析和装配误差溯源的低成本、高精度HUD装配成为可能。对于图1(b)中的反射镜,仅需将装配定

位特征——轴和性能验证特征——自由曲面进行拟合,即可根据定位特征将反射镜与其他零部件进行装配,而后根据曲面性能特征验证光路的准确性,完成可装配性分析。高保真虚拟装配涉及多个关键技术点,其中将物质实体转换为数字模型是虚拟装配技术的基础,后续的光路模拟和装配仿真等重要应用都基于数字模型开展。因此实体光学元件的数字化是虚拟装配的前提,高精度的拟合才能保证虚拟装配中所有计算结果的准确性,快速的拟合才能提高虚拟装配整体流程的效率,故曲面特征高精度快速拟合是光学元件数字化的关键技术点。HUD系统中曲面特征精度与光路精度直接相关,为准确表达制造偏差,其拟合精度需达 μm 级且保证一定的拟合效率,即HUD系统的高保真虚拟装配给自由曲面类特征的光学元件重构提出了超高精度的快速拟合需求。

高精度快速曲面拟合需要低噪声的适量点云数据,可通过滤除噪声与冗余点来获取完整、准确的测量数据^[3]。谷晓英^[4]提出一种基于法矢修正的点云去噪平滑算法;张毅等^[5]通过K近邻搜索建立点云拓扑关系,对噪声点进行去除;封雷等^[6]提出基于遮罩的稀疏点云滤波算法,利用深度搜索算法区分分离群点;刘大峰等^[7]提出一种快速去除散乱点云数据噪声的鲁棒滤波算法;周煜等^[8]提出了以平均曲率为判据的精简算法。

自由曲面拟合可分为基于非均匀有理B样条(Non-uniform rational B-splines, NURBS)和基于三角网格建模两种方法^[9]。其中,作为目前在CAD中应用最为广泛的曲面形式^[10],国内研究人员对NURBS曲面进行

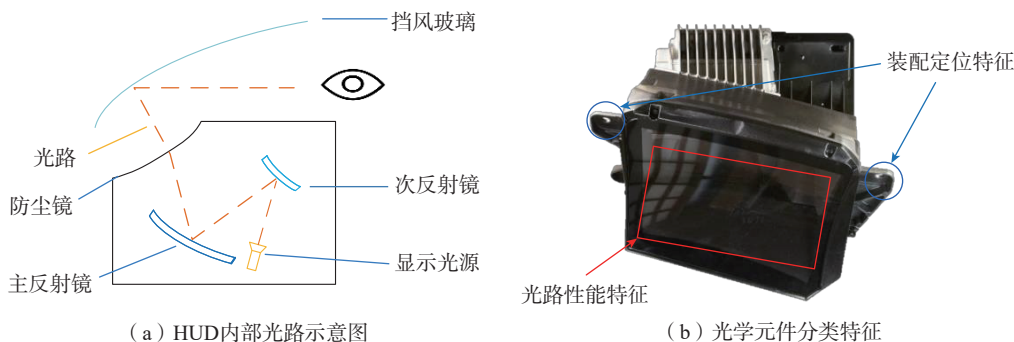


图1 HUD系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of HUD system

了大量研究,如史桂蓉等^[11]先使用简单曲面对模型建立对应拓扑,再拟合连续曲率曲面;张开源等^[12]先对点云降维处理进行平面拟合,而后进行移动最小二乘(MLS)光滑而获得最终曲面;曾清红等^[13]建立了一种基于MLS的曲面拟合方法;付玮等^[14]基于免疫遗传算法对参数化阶段的节点进行自适应计算而完成了曲面拟合。三角网格拟合同样应用广泛, Lin等^[15]利用切平面线形逼近待重建曲面的局部形状来输出三角化曲面;Weir^[16]和来新民^[17]等通过构建网格模型建立基础Delaunay三角域,使用边匹配算法得到四边界区域;何华^[18]提出了一种基于局部特征尺寸的非均匀点云自适应曲面重建算法。

目标点云边界区域形状复杂,需在拟合中生成曲面边界线或对拟合后曲面进行裁剪。Farin^[19]利用双线性孔斯曲面生成B样条曲面控制网格,再将该网格转化为具有固定边界的NURBS曲面。王若莹等^[20]提出了一种直接通过孔斯曲面插值生成NURBS曲面的方法,以提升拟合效率。

综上,现有点云处理、曲面拟合及边界生成均具备

较成熟的算法,但针对HUD高保真虚拟装配中光学元件的曲面高精度快速拟合需求,如何从各类不同精度、效率的算法中进行选择与优化,以获得满足需求的方法并用于高保真虚拟装配过程,成为技术实现的关键。

1 曲面特征高精度快速拟合方法

以蓝光扫描获得的曲面点云为对象,提出一种针对蓝光散乱点云的高精度快速拟合方法,可以在保证拟合精度的基础上兼顾拟合效率,从而满足HUD高保真虚拟装配的准确度与效率要求。自由曲面拟合方法的流程如图2所示。首先使用基于K近邻的蓝光点云复合滤波方法去除原始点云内的噪声点与冗余点;其次使用基于NURBS的快速基面构建与迭代优化拟合方法进行基面的快速拟合,而后通过迭代NURBS拟合曲面以提高精度,并获得按矩形域分布的高精度拟合曲面;最后基于滚球算法提取点云边界,对拟合曲面进行裁剪并旋转至初始位置进行输出。

1.1 基于K近邻的蓝光点云复合滤波方法

扫描设备输出的蓝光无序稠密点云中随机噪声与

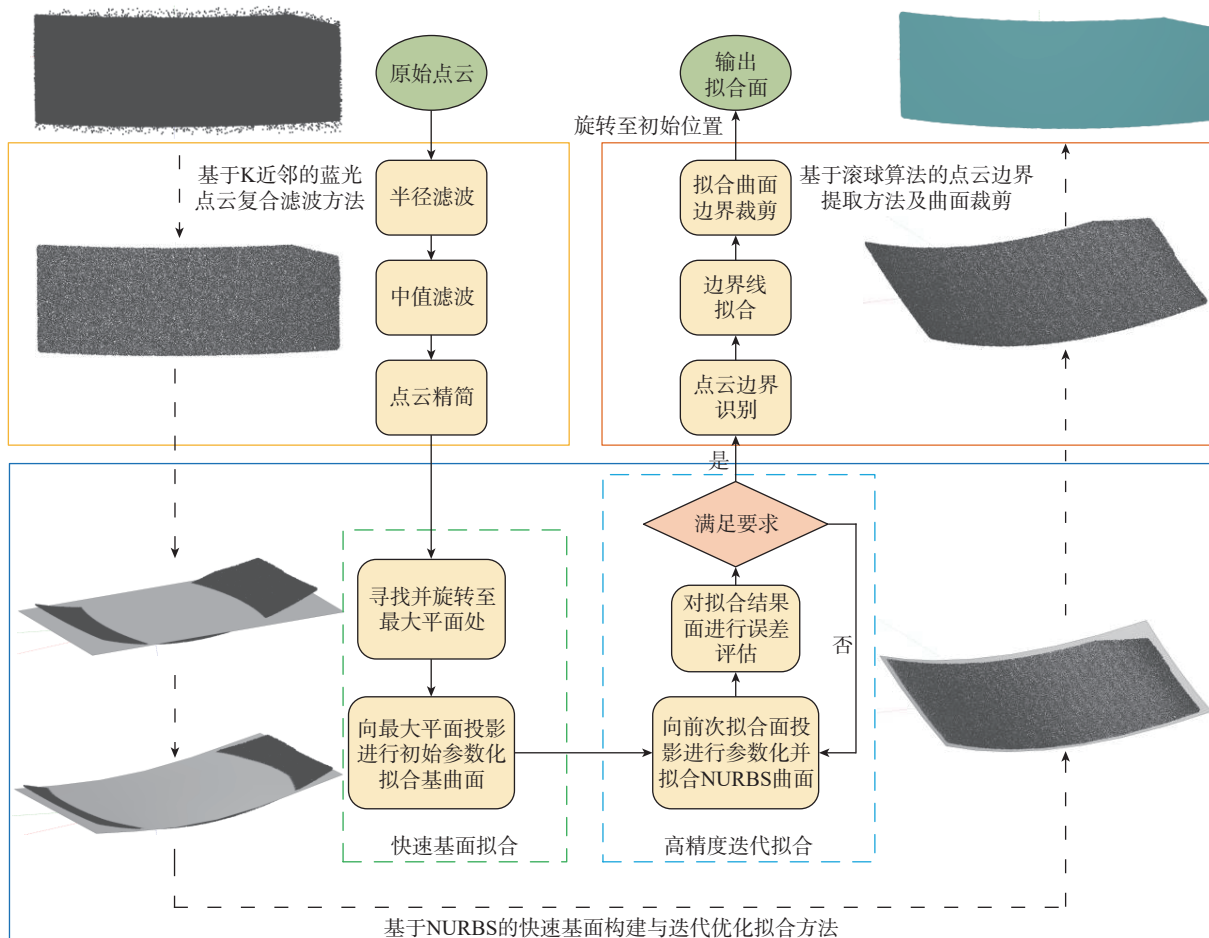


图2 自由曲面拟合方法流程图

Fig.2 Fitting method flow chart of free-form surface

高斯噪声混合分布且包含大量冗余点,传统的单种滤波算法无法一次性去除多种噪声并对点云进行简化。本文提出基于K近邻的点云复合滤波方法,以解决传统方法对蓝光无序稠密点云滤波效果不佳的问题。

(1) 去除点云分布稀疏、远离主体的离群噪声点。如图3所示,由于散乱点云位置分布不具有规律性,采用k维树(k-d树)法进行拓扑建立,并使用基于k-d树搜索半径的滤波方法去噪。指定邻域搜索半径 r_σ ,依据 r_σ 搜索各点邻域点,统计各点邻域内的邻域点数量均值 \bar{N} ,再将各点邻域点数量与 \bar{N} 进行比较,包含点数量小

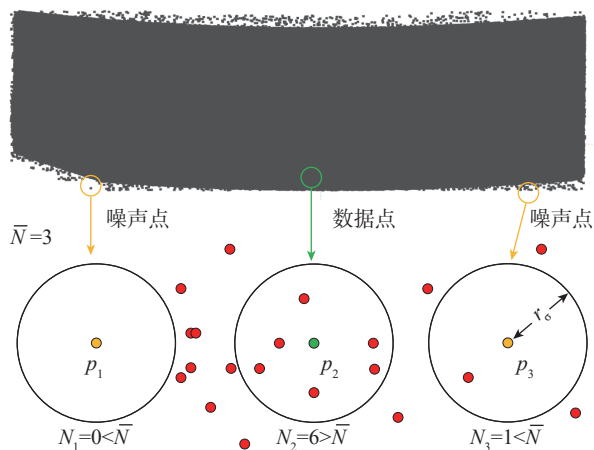


图3 半径滤波原理图
Fig.3 Schematic diagram of radius filtering

于 \bar{N} 的点即判定为离群噪声点进行剔除。根据此方法,图3中的点 p_1 与 p_3 被判定为噪声点。

(2) 去除点云表面的尖锐脉冲噪声。如图4所示,使用中值滤波法对点云进行平滑,统计各点邻域内邻居点的坐标中值,使用中值点代替原来的噪声点以去除表面噪声点并提高平滑度。

(3) 筛选、去除点云冗余点。如图5所示,使用基于八叉树的体素化精简法进行点云精简。使用预设体素边长建立八叉树结构,对划分出的各体素中心进行计算,并筛选出单体素中离中心最近的点,剔除剩余点,以保持点云总体形貌。

综上,基于K近邻的蓝光点云复合滤波方法具体如下。

(1) 输入蓝光点云,设置邻域搜索半径 r_σ 与八叉树最小体素边长 d 。

(2) 建立点云树索引结构。

(3) 基于k-d树搜索任意点 $p_i \in S$ 在 r_σ 范围的K近邻点集 $N_b(p_i)$,即

$$N_b(p_i) = \{(x, y, z) | (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 < r_\sigma^2\} \quad (1)$$

记录点集元素数量 N_i 。

(4) 计算所有点的K近邻点集元素数量均值 \bar{N} ,即

$$\bar{N} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k N_i \quad (2)$$

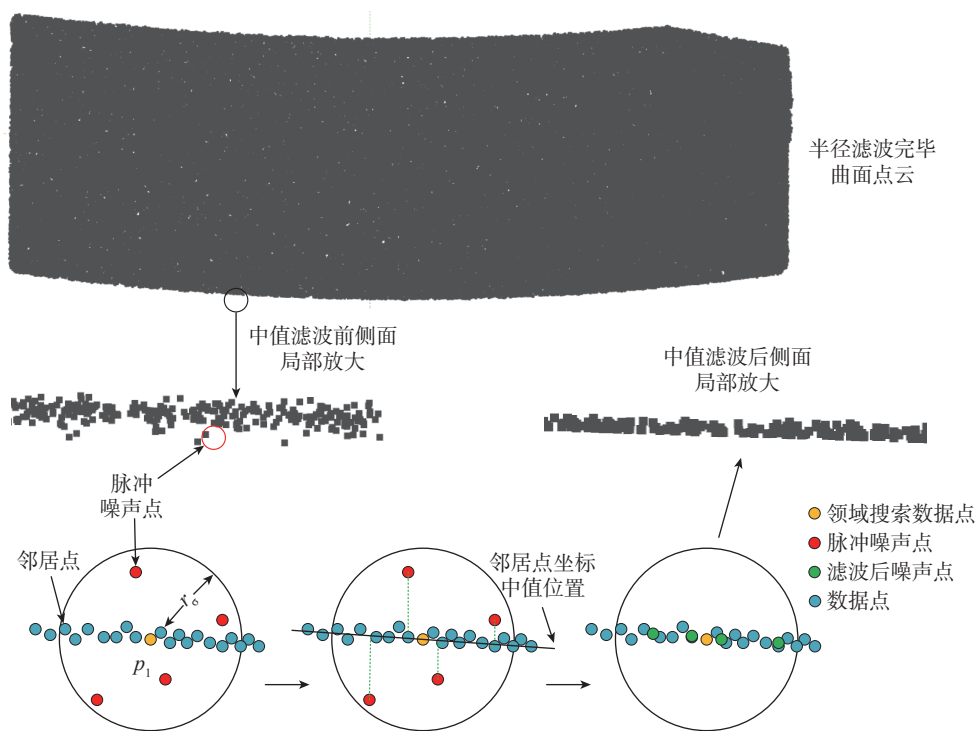


图4 中值滤波原理图
Fig.4 Schematic diagram of median filtering

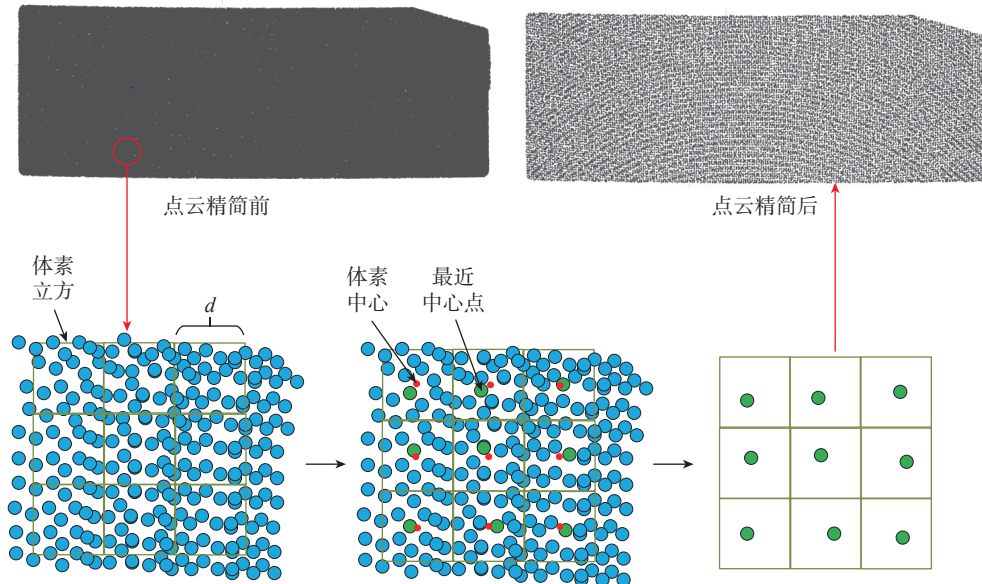


图5 体素化精简原理图

Fig.5 Schematic diagram of voxelized reduction

(5) 比较该点 N_i 与 \bar{N} , 若某点邻域点数量小于均值 (即 $N_i < \bar{N}$), 则剔除该离群噪声点。

(6) 对所有点重复步骤(3)~(5), 剔除所有离群噪声点, 获得点云集 S' 。

(7) 对任意 $p'_i \in S'$, 将其 K 近邻点集 $N_b(p'_i)$ 中所有点按 X - Y - Z 坐标进行排序, 即

$$X = \text{sorted}\{x | (x, y, z) \in N_b(p'_i)\} \quad (3)$$

$$Y = \text{sorted}\{y | (x, y, z) \in N_b(p'_i)\} \quad (4)$$

$$Z = \text{sorted}\{z | (x, y, z) \in N_b(p'_i)\} \quad (5)$$

计算该邻域内中值点 $p'_{i,m} = (\text{median}(X), \text{median}(Y), \text{median}(Z))$, 使用该点替代 p'_i 获得平滑点云集 S'' 。

(8) 对 S'' 按预设体素边长 d 进行体元划分, 建立八叉树结构。

(9) 计算八叉树某体素中心点 $P_{\text{center}}(x_{\text{center}}, y_{\text{center}}, z_{\text{center}})$, 其中

$$x_{\text{center}} = x_{\text{min}} + (\text{col} - 0.5) \times d \quad (6)$$

$$y_{\text{center}} = y_{\text{min}} + (\text{row} - 0.5) \times d \quad (7)$$

$$z_{\text{center}} = z_{\text{min}} + (\text{lay} - 0.5) \times d \quad (8)$$

式中, $x_{\text{min}}, y_{\text{min}}, z_{\text{min}}$ 为该体素的起始顶点三坐标值, $\text{col}, \text{row}, \text{lay}$ 分别为该体素所处的列数、行数、层数。

(10) 计算体素中所有点至 P_{center} 的距离 d_{p_j}

$$d_{p_j} = \sqrt{[(x_j - x_{\text{center}})^2 + (y_j - y_{\text{center}})^2 + (z_j - z_{\text{center}})^2]} \quad (9)$$

保留 d_{p_j} 最小值所对应的点 p_j , 删除其余点。

(11) 对所有体素重复步骤(9)~(10), 获得精简点云, 输出预处理完毕的点云。

1.2 基于 NURBS 的快速基面构建与迭代优化拟合方法

虽然三角网格曲面的拟合速度快, 但其面型不光滑且精度难以满足高保真虚拟装配需求, 而 NURBS 曲面拟合方法精度高但效率较低。因此, 提出基于 NURBS 的快速基面构建与迭代优化拟合方法, 在继承 NURBS 方法高精度优点的前提下, 提高了基面拟合速度。

NURBS 曲面拟合基面构造一般使用平面、柱面等简单曲面。HUD 中的光学元件曲面具有曲率较小、无卷曲的特点, 故使用平面基面构造。平面构造能避免在首次精度不高的基面拟合中进行过多计算, 进而提高基面拟合效率。使用随机采样一致性 (Random sample consensus, RANSAC) 算法快速搜寻点云的最大平面位置^[21], 过程如下。

(1) 先从点云中随机抽取 k 个点, k 为确定平面的最小元素个数, 平面取 3 点 p_0, p_1, p_2 。

(2) 生成经过 p_0, p_1, p_2 的平面 $A_0x + B_0y + C_0z + D_0 = 0$ 。

(3) 计算其余点在平面两侧指定阈值 d' 内的点个数, 并记录内点数量。

(4) 重复步骤(1)~(3) 获得内点数量最多的平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ 作为结果输出。

依据该平面的法向量 $N = (A, B, C)$ 方向旋转平面与点云至平行于 XOY 平面, 旋转完毕后确定曲面的 UV 方向用于后续参数化, 如图 6 所示。

然后对点集进行参数化, NURBS 张量积曲面分布

域为矩形,因此使用拟合平面的四边作为点集边界线。依据预设网格数量 $m \times n$ 将点投影至最大平面后完成数据点参数化,使用参数化的数据点进行基曲面拟合。

设数据点 p_r 在基平面上对应的点参数为 (u_r, v_r) , 距离权重为 w_r , 则有

$$\sum_{r=1}^m w_r^2 \|S(u_r, v_r) - p_r\|^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

引入曲面能量函数作为平滑项以约束拟合曲面 S 在参数方向 u, v 上的光滑度, 能量函数表达式为

$$F_{\text{smooth}}(s) = \iint_{\Omega} (S_{uu}^2 + 2S_{uv}^2 + S_{vv}^2) du dv \quad (11)$$

$$\text{式中, } S_{uu}^2 = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2}; S_{uv}^2 = \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial v}; S_{vv}^2 = \frac{\partial^2 S}{\partial v^2}。$$

将拟合这一最小二乘问题标记为

$$F_{\text{lsq}}(s) = \sum_{r=1}^m w_r^2 \|S(u_r, v_r) - p_r\|^2 \quad (12)$$

为能量函数引入权重 λ , 则整体曲面拟合可表达为

$$F_{\text{comp}}(s) = F_{\text{lsq}}(s) + \lambda F_{\text{smooth}}(s) \rightarrow \min \quad (13)$$

Bezier 曲面的全局性可避免数据点缺失造成的拟合失败, 因此使用 3 次 Bezier 曲面进行基面最小二乘拟合以提高算法鲁棒性。Bezier 曲面的控制点越多计算越复杂, 精度也会同时提高, 但易使曲面奇异而致拟合失败, 因此需在满足目标精度的前提下使用最少控制点。设拟合面控制点集合为 $(m+1) \times (n+1)$ 列, 即控制点集为 $S_{i,j} (i=0, \dots, m; j=0, \dots, n)$, 样条曲线基阶数为 k' , 两节点矢量分别为 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{m+k'+1}]$ 与 $V=[v_0, v_1, \dots, v_{n+k'+1}]$, 则 Bezier 曲面方程为

$$R_{k'}(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n S_{i,j} N_{i,k'}(u) N_{j,k'}(v) \quad (14)$$

式中, $S_{i,j}$ 为曲面控制顶点; $N_{i,k'}(u), N_{j,k'}(v)$ 为曲面上 u, v 方向样条曲线对应的 k' 阶伯恩斯坦多项式。假定有 g 个数据点 $P_r (i=1, \dots, g)$, 对应参数值为 $\{(u_r, v_r) | i=1, \dots, g\}$, 则曲面拟合的数据点逼近转化为如下最小二乘问题, 即

$$F_{\text{lsq}}(s) = \sum_{r=1}^m w_r^2 \left\| \sum_{k=0}^{n-1} R_k(u_r, v_r) - p_r \right\|_2^2 = \|D(Ns - p)\|_F^2 \quad (15)$$

式中, D 为数据点权因子对角矩阵, $D = \text{diag}(\omega_1, \dots, \omega_m) \in R^{m \times m}$; N 为基函数值矩阵, $N = (N_{k'-1}(u_r, v_r))_{r,k'} \in R^{m \times n}$; s 为控制点坐标矩阵, $s = (s_0, \dots, p_{n-1})^T \in R^{n \times 3}$; p 为数据点坐标矩阵, $p = (p_1, \dots, p_m)^T \in R^{m \times 3}$ 。

以矩阵形式可将上述加权最小二乘问题表述为线性系统, 即

$$(DN)^T(DN)s = (DN)^T(Dp) \quad (16)$$

上式为超定线性方程组, 需要保证列满秩, 因此在建立方程组时要确保没有重复点。

基面拟合完毕, 将数据点投影至基面进行二次拟合, 使用牛顿迭代法进行数据点投影。投影点可归纳为: 空间点 $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 存在一曲面上的对应点 P_s 使 $P_r P_s \perp S$, 使用牛顿迭代法寻找 $P_r P_s$ 距离最短的 P_s , 若距离小于设定阈值则认为该点是 P_r 在曲面 S 上的投影点。使用参数化中的数据点关联参数作为迭代初值, 其中 u, v 方向初值分别为 u_0, v_0 , 设数据点在曲面上的投影点为 $S(u, v)$, 即可得到向量函数如下。

$$r(u, v) = S(u, v) - P_r \quad (17)$$

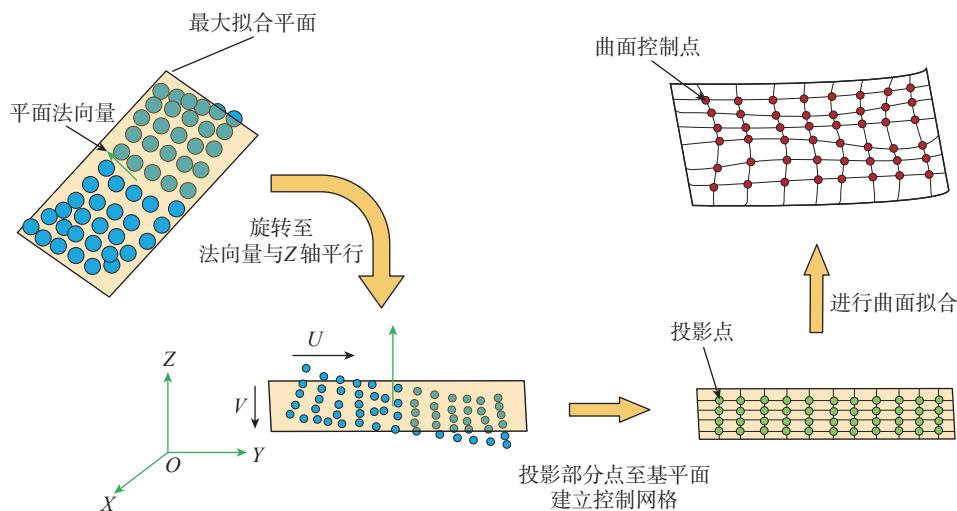


图 6 基面拟合原理图

Fig.6 Schematic diagram of base plane fitting

其标量形式为

$$\begin{cases} f(u, v) = r(u, v) \cdot S_u(u, v) = 0 \\ g(u, v) = r(u, v) \cdot S_v(u, v) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

牛顿迭代公式如下。

$$J_i \sigma_i - \kappa_i = 0 \quad (19)$$

式中, $\sigma_i = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{i+1} - u_i \\ v_{i+1} - v_i \end{bmatrix}$; 雅可比矩阵 J_i 中的参数可从 (u_i, v_i) 点处获得, 则

$$J_i = \begin{bmatrix} f_u & f_v \\ g_u & g_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |S_u|^2 + r \cdot S_{uu} & S_u \cdot S_v + r \cdot S_{uv} \\ S_u \cdot S_v + r \cdot S_{vu} & |S_v|^2 + r \cdot S_{vv} \end{bmatrix};$$

$$\kappa_i = - \begin{bmatrix} f(u_i, v_i) \\ g(u_i, v_i) \end{bmatrix}.$$

解得 σ_i 可获得递推为

$$\begin{aligned} u_{i+1} &= \Delta u + u_i \\ v_{i+1} &= \Delta v + v_i \end{aligned} \quad (20)$$

其中, 使用欧式距离 ε_1 与零度余弦量 ε_2 作为收敛准则, 判断是否为曲线上的投影点, 收敛条件如下。

$$\begin{cases} |(u_{i+1} - u_i)S_u(u_i, v_i) + (v_{i+1} - v_i)S_v(u_i, v_i)| \leq \varepsilon_1 \\ |S(u_i, v_i) - P| \leq \varepsilon_1 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{|S_u(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P)|}{|S_u(u_i, v_i)| |S(u_i, v_i) - P|} \leq \varepsilon_2 \\ \frac{|S_v(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P)|}{|S_v(u_i, v_i)| |S(u_i, v_i) - P|} \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (22)$$

当 2 个收敛条件同时满足时退出迭代, 获得点 P 即为 p_r 在曲面 S 上的投影点。拟合曲面上投影点 P 的参数 (u, v) 作为新拟合条件进行后续迭代拟合, 以逐次提高参数化与拟合精度, 使用原数据点到拟合面的法向距离 \bar{d} 进行精度评价, 该值小于拟合的目标阈值 d_σ 即退

出迭代, 即

$$\bar{d} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k |d_i| < d_\sigma \quad (23)$$

迭代结束后获得大于点云数据分布范围的四边域高精度 NURBS 拟合曲面, 迭代拟合过程如图 7 所示。此时的 NURBS 拟合曲面已经可以高精度地反映小曲率自由曲面的面型信息, 但原点云的边界信息还未在 NURBS 拟合曲面上有所体现, 还需对 NURBS 拟合曲面的边界进行处理。

1.3 基于滚球算法的点云边界提取方法及曲面裁剪

传统软件中含边界的拟合需提前指定曲面边界, 且精度要求高时需人工介入, 效率低、灵活性差。本文基于滚球算法实现点云边界提取与边线拟合, 使用边线对 NURBS 拟合曲面进行裁剪。三维空间中点云边界提取不稳定, 可投影至寻得的最大平面上, 通过二维点云的边界搜索以提高效率与准确性。

设投影后点云二维点集为 S_1 , 在其中任取两点 p_1 、 p_2 , 过该两点绘制半径为 R 的圆, 若该圆内未包含其他点, 则 $p_1 p_2$ 即为边界线段, 将 p_1 、 p_2 存入边界点集 S'_1 , 再将圆绕 p_2 逆时针旋转至经过 p_3 , 依次滚动经过点集边界, 提取获得边界点集 S'_1 , 实测点云参数 $R=2 \text{ mm}$ 圆的边界提取及裁剪如图 8 所示。将边界点集 S'_1 映射至拟合曲面, 获得曲线上的曲线点集 S''_1 , 并以 S'_1 内点 p'_1 为端点, 以二维化投影反方向为射线方向构造射线, S'_1 的射线簇与曲面交点集即为 S''_1 。将该射线所在直线表示为两正交平面 $P_1 = (N_1, d_1)$ 与 $P_2 = (N_2, d_2)$ 的交线, N_i 为垂直于射线方向的单位正交向量, 且 $d_i = (N_i p'_i)$, 则求交问题转化为如下方程。

$$R(u, v) = \begin{bmatrix} N_1 S(u, v) + d_1 \\ N_2 S(u, v) + d_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

使用牛顿迭代进行求解, 递推关系如下。

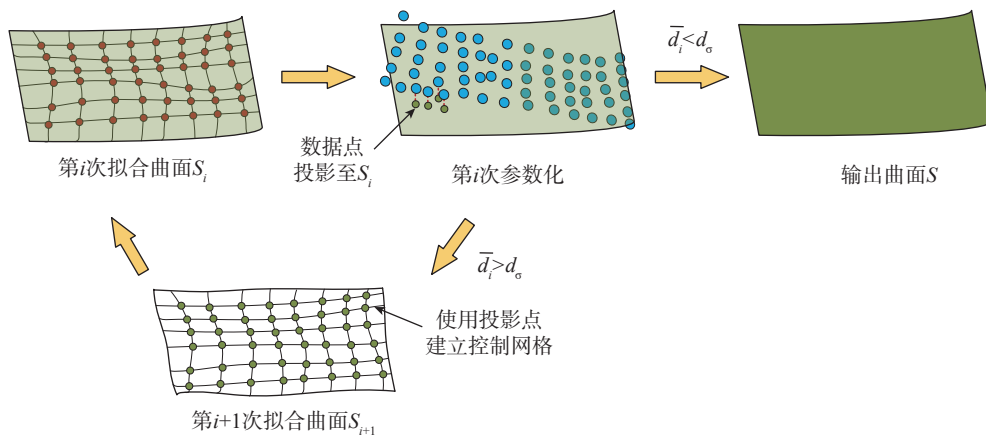


图 7 迭代拟合原理图

Fig.7 Schematic diagram of iterative fitting

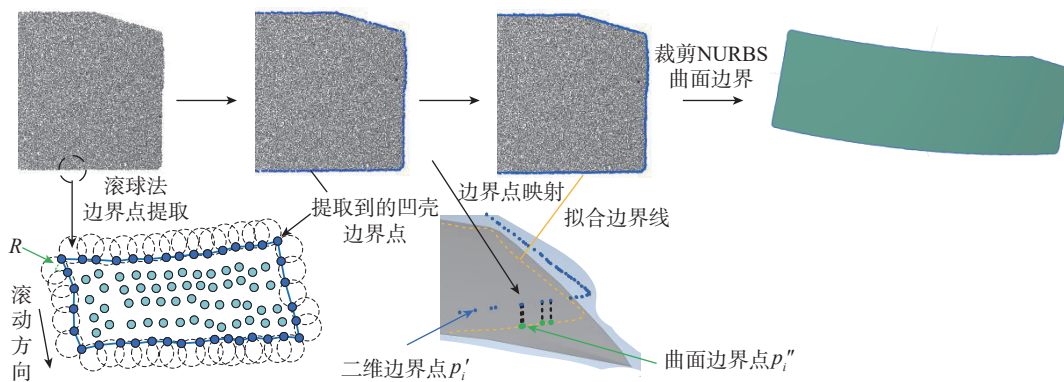


图8 NURBS 边界提取和裁剪流程图

Fig.8 Schematic diagram of NURBS boundary extraction and clipping

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} - \mathbf{J}^{-1} \mathbf{R}(u_n, v_n) \quad (25)$$

式中, \mathbf{J} 为雅可比矩阵, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} N_1 S_u(u, v) & N_1 S_v(u, v) \\ N_2 S_u(u, v) & N_2 S_v(u, v) \end{bmatrix}$ 。

迭代收敛条件如下。

(1) 曲面上点到两平面的距离小于阈值 ε :

$$|\mathbf{R}(u_n, v_n)| < \varepsilon \quad (26)$$

(2) 迭代开始发散:

$$|\mathbf{R}(u_{n+1}, v_{n+1})| > |\mathbf{R}(u_n, v_n)| \quad (27)$$

(3) 迭代次数到达指定值 n_{\max}

$$n = n_{\max} \quad (28)$$

满足任一收敛条件即停止迭代, 获得曲线点集 S'' ,

使用3次B样条曲线依次拟合点集内的各点, 获得曲面边界线 C , 使用 C 裁剪曲面来获得含边界的曲面。

2 曲面特征拟合算法验证试验

设计加工 HUD 标准套件(共包含 13 个零部件), 囊括实际 HUD 产品的主要装配与性能特征(平面、槽、孔、自由曲面等), 自由曲面特征主要位于主反射镜处。通过三坐标测量设备(图 9, 参数见表 1) 获取装配后主反射镜零件自由曲面特征点云, 作为实测表面的标定数据。使用蓝光扫描设备(图 10, 参数见表 2) 获取主反射镜零件的自由曲面特征作为算法输入点云, 通过比较相同算法下蓝光点云拟合面与标定点云的法向距离进行拟合精度评价, 并将本文方法精度、效率与其他传统拟合算法进行对比。

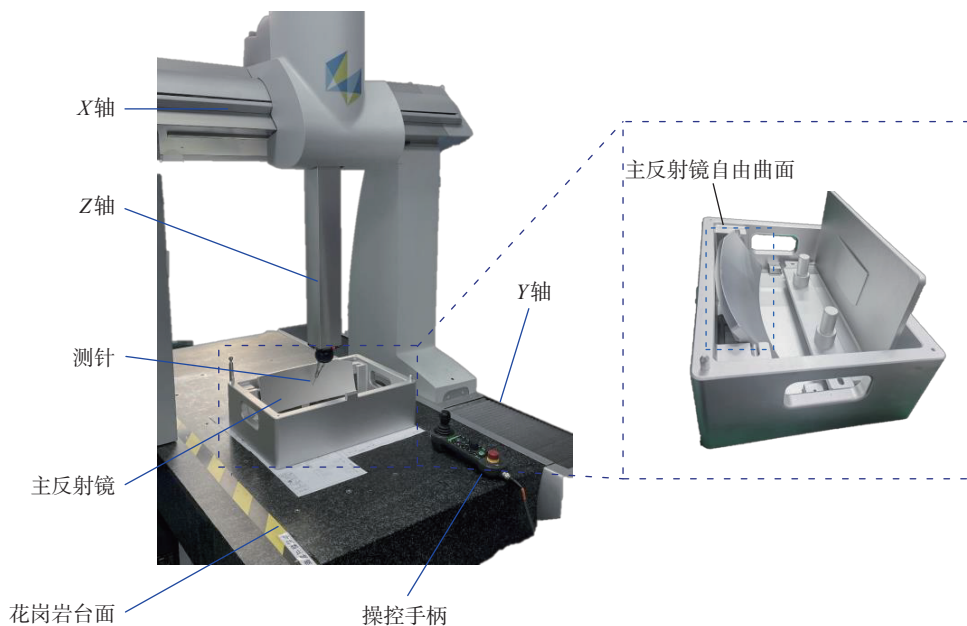


图9 三坐标数据测量设备

Fig.9 Three-coordinate measuring equipment

2.1 点云滤波效果及效率验证试验

算法运行的计算机平台处理器为英特尔 i5-10400, 处理器频率为 2.90 GHz; 显示适配器为英伟达 GeForce GTX 1050, 运行内存为 16 GB RAM; 软件运行平台为 Windows 10 操作系统; 算法开发环境为 VS Code 2019。使用本文方法对蓝光原始点云进行滤波, 并将滤波结果与主流点云处理软件 CloudCompare 中滤波模块的处理结果进行比较(表 3), 由于该软件不具备一键滤波与简化功能, 故先后使用统计滤波和采样功能对蓝光点云进行简化。使用同一输入点云进行滤波处理, 相较于

CloudCompare 软件方法, 本文方法的点云总体简化率提高 28.59%, 运算时间缩短了 38.678 s, 在处理效率方面有较大提升。

使用 NURBS 节点插值法^[22]分别对本文方法与软件方法的滤波结果进行点云曲面拟合, 结果如图 11 所示。可以看出, CloudCompare 软件方法的拟合整体精度差, 合格点占比仅为 6.14%, 且拟合面存在大量褶皱与扭曲(图 11 (a)), 而使用本文方法滤波后的点云拟合面精度较高, 光滑度更好(图 11 (b))。可见本文方法的滤波结果可提高 NURBS 曲面拟合的精度与光滑度,

表 1 三坐标测量设备参数
Table 1 Parameters of three-coordinate measuring equipment

品牌型号	行程范围/mm	测量平台材质及平面度标准	测量分辨率/ μm	测头类型	Z 轴驱动方式	标尺类型
HEXAGON GLOBAL-PLUS	800 × 1200 × 600	花岗岩和 DIN 876	0.005	触发测头	可调式平衡气动	高分辨率光栅尺

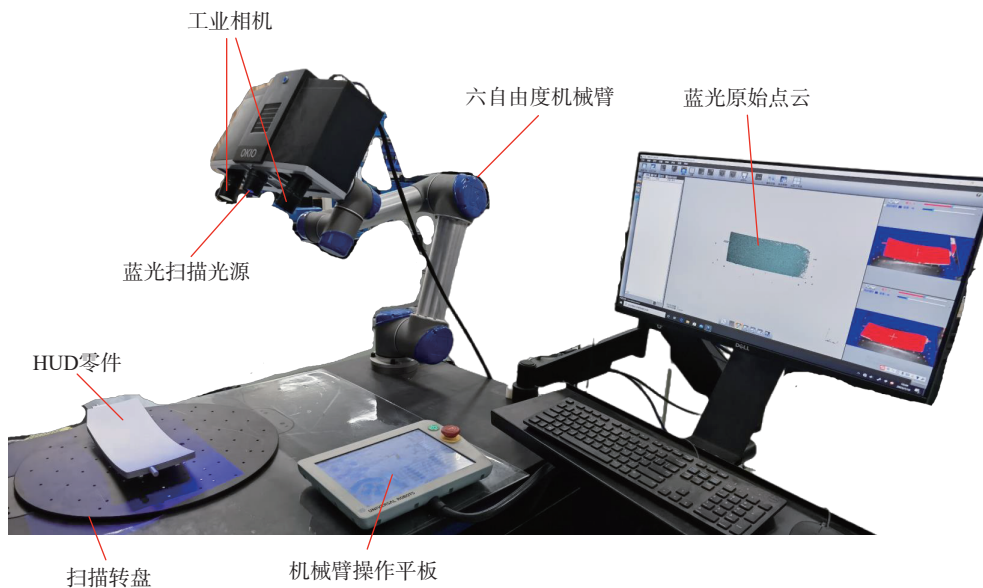


图 10 蓝光扫描设备
Fig.10 Blue-ray scanning equipment

表 2 蓝光扫描设备参数
Table 2 Parameters of blue-ray scanning equipment

品牌型号	扫描对象尺寸/mm	测量精度/mm	传感器分辨率/px	光源类型	扫描方式	电源
OKIO-H-800	300~1000	0.015	5000000 × 2	蓝光 LED	非接触拍照式	DC 24 V, 3.75 A

表 3 滤波结果对比
Table 3 Comparison of filtering results

方法	原始点云数量/个	去除噪声点云数量/个	滤波结果点云数量/个	简化后点云数量/个	简化率/%	运算时间/s
本文方法	802267	28846	773421	100269	87.04	3.044
软件方法	802267	15324	786943	326941	58.45	41.722

同时计算效率也远优于 CloudCompare 软件方法。

2.2 曲面拟合精度对比验证试验

以本文滤波方法处理后的结果点云作为拟合对象,分别使用 NURBS 切片拟合法^[12]、NURBS 局部拟合法^[13]、NURBS 节点插值法^[22]、主流商用软件 PolyWorks 的 NURBS 拟合功能模块和本文方法进行拟合,并在相同坐标系下计算标定云点至各个拟合面的法向距离,将该距离作为误差指标以评价拟合精度,对比几种方法的

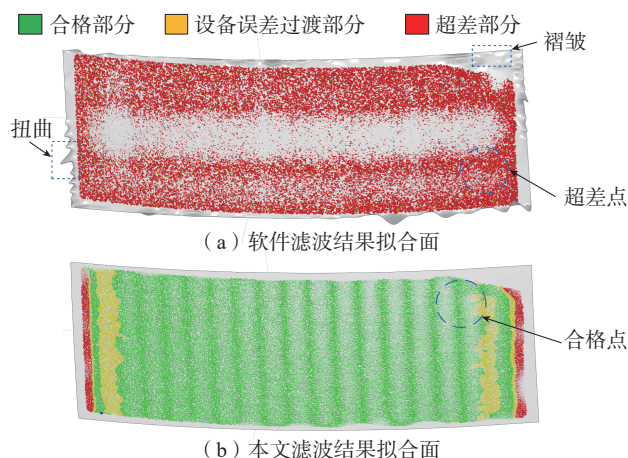


图 11 两种方法滤波结果的曲面拟合误差对比
Fig.11 Surface fitting error comparison of two methods

误差极值、均值与标准差,如表 4 所示。可以看出,本文方法拟合的最大正向误差仅为节点插值法的 41.6%;最大负向误差仅为局部拟合法的 15.1%;与其他 4 种算法中的最优算法(插值法)相比,平均误差精度提升了 2 个数量级,在稳定性方面表现优异,并能反映点云边界信息。

图 12 为不同算法根据拟合误差数值进行点云颜色渲染的对比,图 13 为各算法的拟合误差散点图。从图 12 可以看出,由于切片步长固定的影响,切片法拟合面在拟合边缘有多处小褶皱,导致边缘精度较差(图 12 (a));局部法拟合的边缘拟合精度较高,但局部收敛特点导致内部存在一定的负向偏差,总体拟合精度不高(图 12 (b));插值法拟合面在曲面镜两侧曲率较大的部位出现了较多偏差,拟合的适应性不强(图 12 (c));PolyWorks 软件拟合面的边缘无法包络点云边界(图 12 (d)中蓝色框线),且拟合误差与标准差极大,拟合面中合格点占比仅为 20%左右;本文方法在内部与边缘均能保持高精度拟合(图 12 (e))。由图 13 可知, PolyWorks 软件方法中由于拟合面无法包络所有点云,仅计算面内点至拟合面的距离,因此统计点数量少于其他算法的拟合面,而相较其他主流 NURBS 拟合算法,本文方法在数值大小与稳定性方面更优。

表 4 不同算法的拟合结果对比

Table 4 Comparison of simulation results of different algorithms

算法	拟合点云数量 / 个	最大正向误差 /mm	最大负向误差 /mm	平均误差 /mm	标准差 /mm	能否拟合点云边界
切片拟合法	100269	0.02227	-0.06933	-5.264×10^{-5}	0.002923	否
局部拟合法	100269	0.01545	-0.01958	6.24×10^{-3}	0.001967	否
插值法	100269	0.009821	-0.03727	3.695×10^{-5}	0.004468	否
软件方法	100269	0.07798	-0.1043	-0.002465	0.027007	否
本文方法	100269	0.004082	-0.002959	-1.297×10^{-7}	0.00013	是

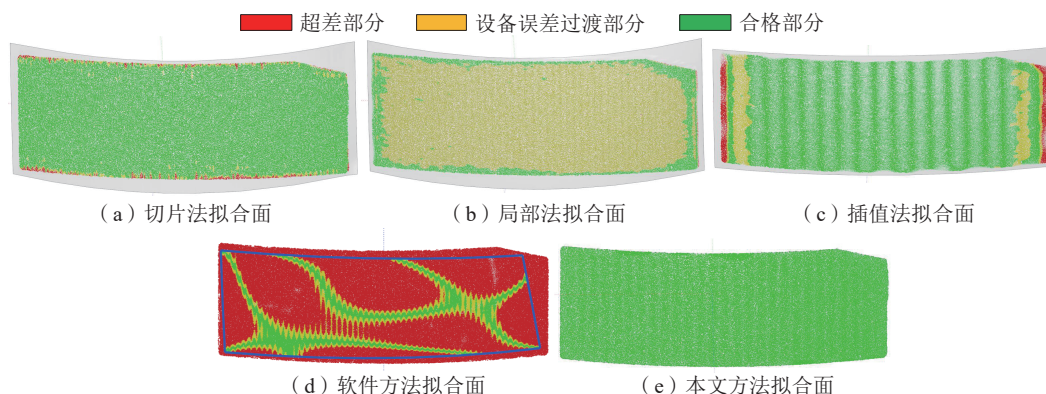


图 12 不同算法的拟合误差对比
Fig.12 Fitting error comparison of different algorithms

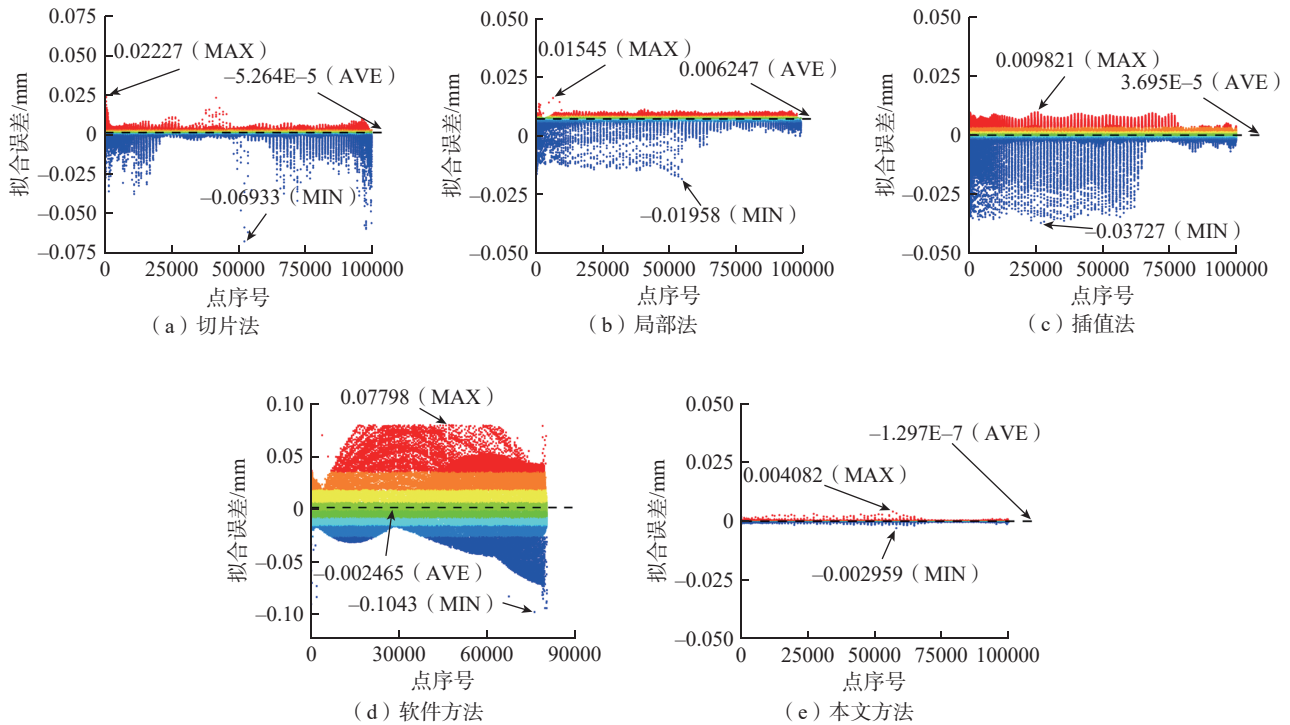


图 13 不同算法的拟合误差散点图

Fig.13 Fitting error scatter plots of different algorithms

图 14 为不同算法的拟合时间与误差折线图,其中绿色虚线为标准曲面表面(0 误差面)。可以看出,相较于其他拟合算法,本文方法能在保持较短运算时间的同时具备极高的拟合精度,且能反映拟合点云的边界信息,可以较好地兼顾拟合精度与效率。

3 结论

本文提出了一种面向抬头显示设备(Head-up display, HUD)高保真虚拟装配的零件曲面特征高精度快速拟合方法,并开展了点云滤波与曲面拟合试验,比较了本文方法与主流软件方法的精度与效率,主要结论如下。

(1) 提出一种基于 K 近邻的点云复合滤波方法,可一次性去除蓝光点云中的随机噪声、高斯噪声、脉冲噪声与冗余点,相较于主流点云处理软件 CloudCompare 的点云滤波功能,所提滤波方法的点云简化率提高 28.59%,运算时间从 41.722 s 缩短至 3.044 s。

(2) 提出基于非均匀有理 B 样条(Non-uniform rational B-splines, NURBS)的快速基面构建与迭代优化拟合方法,然后针对蓝光点云进行快速高精度拟合,相较于主流曲面拟合方法,所提拟合方法的最大正向误差仅为节点插值法的 41.6%,最大负向误差仅为局部拟合法的 15.1%,与其他 4 种算法中的最优算法相比,平均误差精度提升了 2 个数量级,且相比之下具有最佳的精度稳定性。

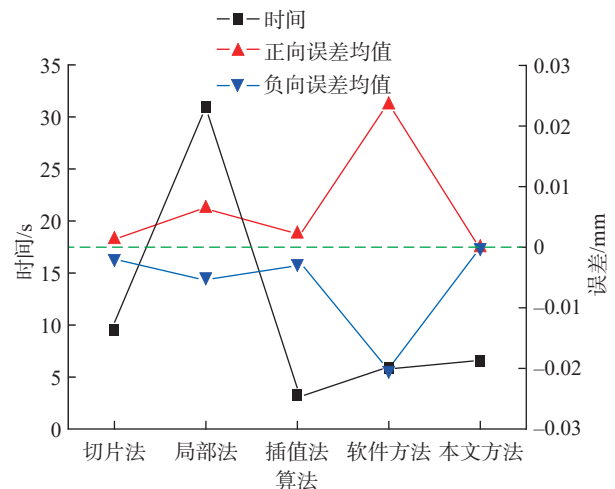


图 14 不同算法的拟合时间及误差折线图

Fig.14 Fitted time and error line plots of different algorithms

(3) 基于滚球算法提出的点云边界检测与曲面裁剪技术,可解决传统 NURBS 曲面难以反映点云实际边界的问题。

综上,本文所提曲面特征高精度快速拟合方法解决了面向 HUD 高保真虚拟装配中高精度/高效率曲面拟合的问题,对高保真虚拟装配的应用具有重要意义。

参考文献

[1] ABIDI M H, AL-AHMARI A, AHMAD A, et al. Assessment

of virtual reality-based manufacturing assembly training system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(9): 3743–3759.

[2] NEPOMILUEV V V, SEMENOV A N. Virtual testing in assembly[J]. Russian Engineering Research, 2019, 39(7): 625–627.

[3] 戴静兰. 海量点云预处理算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

DAI Jinglan. A research on preprocessing algorithms of mass point cloud[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[4] 谷晓英. 三维重建中点云数据处理关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.

GU Xiaoying. Research on the key technologies of point clouds processing in 3D reconstruction[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.

[5] 张毅, 刘旭敏, 隋颖, 等. 基于K-近邻点云去噪算法的研究与改进[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 1011–1014.

ZHANG Yi, LIU Xumin, SUI Ying, et al. Research and improvement of denoising method based on K-neighbors[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 1011–1014.

[6] 封雷, 朱登明, 李兆敬, 等. 一种基于遮罩的稀疏点云滤波算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(5): 25–32.

FENG Lei, ZHU Dengming, LI Zhaoxin, et al. Sparse point cloud filtering algorithm based on mask[J]. Computer Science, 2022, 49(5): 25–32.

[7] 刘大峰, 廖文和, 戴宁, 等. 散乱点云去噪算法的研究与实现[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 1108–1112.

LIU Dafeng, LIAO Wenhe, DAI Ning, et al. Research and implementation for denoising noisy scattered point data[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(6): 1108–1112.

[8] 周煜, 张万兵, 杜发荣, 等. 散乱点云数据的曲率精简算法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 785–789.

ZHOU Yu, ZHANG Wanbing, DU Farong, 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.

[9] 隋连升, 蒋庄德. 栅格型点云数据的自由曲面建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(10): 1293–1297.

SUI Liansheng, JIANG Zhuangde. Free form surface modeling with grid cloud data[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(10): 1293–1297.

[10] 贺美芳. 基于散乱点云数据的曲面重建关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

HE Meifang. Research on key technologies of surfaces reconstruction based on scattered point cloud data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.

[11] 史桂蓉, 邢渊, 张永清. 反向工程几何建模自动化系统[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 392–395.

SHI Guirong, XING Yuan, ZHANG Yongqing. Reverse-engineering automatic geometry modelling system[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2000, 34(3): 392–395.

[12] 张开源, 郑德华, 张崇军. 基于点云切片技术的曲面拟合方法研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(12): 35–37, 48, 9.

ZHANG Kaiyuan, ZHENG Dehua, ZHANG Chongjun. Research

on the surface fitting method based on point cloud slicing[J]. Geospatial Information, 2018, 16(12): 35–37, 48, 9.

[13] 曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004, 25(1): 84–89.

ZENG Qinghong, LU Detang. Curve and surface fitting based on moving least-squares methods[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(1): 84–89.

[14] 付玮, 吴禄慎, 陈华伟. 基于免疫遗传和蚁群融合算法的散乱点云曲面拟合[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 424–430.

FU Wei, WU Lushen, CHEN Huawei. Scattered point clouds surface fitting based on immune genetic and ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 424–430.

[15] LIN A C, CHEN C F. Point-data processing and error analysis in reverse engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(11): 824–834.

[16] WEIR D J, MILROY M J, BRADLEY C, et al. Reverse engineering physical models employing wrap-around B-spline surfaces and quadrics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1996, 210(2): 147–157.

[17] 来新民, 黄田, 曾子平, 等. 基于NURBS的散乱数据点自由曲面重构[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(5): 433–436.

LAI Xinmin, HUANG Tian, ZENG Ziping, et al. NURBS based approach of surface reconstruction from scattered data[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 1999, 11(5): 433–436.

[18] 何华. 散乱点云数据三角网格曲面重建研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.

HE Hua. On triangle mesh surface reconstruction for scattered point clouds[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2018.

[19] FARIN G. Curvature continuity and offsets for piecewise conics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1989, 8(2): 89–99.

[20] 王若莹, 邵利平. NURBS边界曲面直接生成法[J]. 计算机应用, 2008, 28(1): 174–176, 180.

WANG Ruoying, SHAO Liping. Direct generation method of NURBS boundary surface[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(1): 174–176, 180.

[21] 张中岳, 周惠兴, 王舜, 等. 基于RANSAC的WTLS平面拟合算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(6): 93–98.

ZHANG Zhongyue, ZHOU Huixing, WANG Shun, et al. Research on algorithm of plane fitting of RANSAC–WTLS[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(6): 93–98.

[22] 黄紫双. 基于NURBS的曲面拟合和优化方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.

HUANG Zishuang. Research on surface fitting and optimization method based on NURBS[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.

通信作者: 黄翔, 教授, 研究方向为飞机装配、数字化测量和智能制造等。

(责编 向阳)