

引文格式: 鲁小翔, 黄翔, 李根, 等. 一种面向蒙皮对缝测量的双线结构光标定方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(20): 100-108.

LU Xiaoxiang, HUANG Xiang, LI Gen, et al. A calibration method of double line structured light for skin seam measurement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(20): 100-108.

一种面向蒙皮对缝测量的双线结构光标定方法*

鲁小翔¹, 黄翔¹, 李根², 赵子越³, 孟亚云¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学苏州研究院, 苏州 215000;

3. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

[摘要] 针对双线结构光蒙皮对缝测量系统对光平面高精度标定的需求, 提出一种基于二维靶标的双线结构光平面标定方法。首先以靶标平面上的基准点为输入, 构建靶标平面位姿解算模型, 获取其在相机坐标系下的平面方程; 然后依据相机的线面模型, 对拟合控制点进行深度重建; 最后使用特征值法对去噪后的拟合控制点集进行拟合, 完成双线结构光平面标定。试验表明, 该方法能够同时完成测量系统中两个光平面的标定; 标定后系统的对缝间隙重复测量精度优于 0.050 mm, 对缝阶差重复测量精度优于 0.030 mm。

关键词: 双线结构光; 光平面; 标定; 对缝间隙; 对缝阶差

A Calibration Method of Double Line Structured Light for Skin Seam Measurement

LU Xiaoxiang¹, HUANG Xiang¹, LI Gen², ZHAO Ziyue³, MENG Yayun¹

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

2. Suzhou Research Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Suzhou 215000, China;

3. AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirement of high-precision calibration of light plane for double-line structured light skin seam measurement system, a calibration method of two-line structured light plane based on planar target is proposed. First, take the datum point on the target plane as input, construct the target plane pose solution model, and obtain its plane equation in the camera coordinate system. Then, according to the line surface model of the camera, the depth of the fitting control points is reconstructed. Finally, the eigenvalue method is used to fit the denoised fitting control point set to complete the calibration of double-line structured light plane. Experiments show that this method can simultaneously complete the calibration of two light planes in the measurement system. After calibration, the repeated measurement accuracy of seam gap is better than 0.050 mm, and the repeated measurement accuracy of seam flush is better than 0.030 mm.

Keywords: Double line structured light; Light plane; Calibration; Seam gap; Seam flush

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.20.100

对缝特征广泛存在于飞机蒙皮表面, 是飞机表面平滑度的主要评价指标。随着飞机隐身及气动性能的提高^[1-2], 传统蒙皮测量方法已经难以满足实际测量需求。

线结构光三维视觉测量是一种借助线结构光平面重建待测特征空间信息的技术, 其以抗干扰能力强、精度高且非接触等优点, 正越来越广泛地应用于飞机蒙皮对缝

* 基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2018205B005)。

特征的测量。

待测特征三维空间信息的重建精度是保证测量精度的前提,而线结构光平面的标定精度是保证待测特征重建精度的关键。近年来,对线结构光平面标定的研究主要集中在高精度的光平面拟合控制点的获取上。常见的方法有周富强等^[3]利用一维靶标上基准点的距离及方向约束,基于消隐点原理解算出一维靶标在相机坐标系中的直线方程,最后由射影变换和直线方程获得待标定光平面上的拟合控制点;韩建栋等^[4]提出基于三点透视(P3P)原理,利用标定靶标上3个等距的共线点解算出待标定光平面上的拟合控制点;Wei等^[5]提出利用已知等距的平行线求取平面消隐线的原理完成拟合控制点的提取。上述方法常用于大视场的线结构光平面标定,且标定过程中获取的光平面拟合控制点数量较少,标定方法鲁棒性较差。Wu^[6]和Zhou^[7]等提出利用相机标定过程中获得的外参数拟合靶标平面,再以靶标平面上的特征线与光条的交点为拟合控制点。该方法需要通过相机标定来获取靶标平面在相机坐标系中的位姿,标定过程较为繁琐,且该方法获取的拟合控制点为相关特征的交点,仍存在拟合控制点数量少的问题。Dewar等^[8]提出拉丝法,此方法通过提取结构光光平面与细丝干涉后形成干涉亮点来获取拟合控制点;段发阶等^[9]提出使用结构光光平面与锯齿形三维靶标干涉后形成的转折点来获取光平面拟合控制点,上述方法所需标定靶标精度要求高、制造难度较大。陈天飞等^[10]提出基于机器人的自标定方法,该方法依靠机器人自身的高精度运动,构建附加约束,完成拟合控制点的提取;张曦等^[11]提出的标定方法对机械运动精度要求高且标定过程复杂,难以广泛应用。

综上所述,当前标定方法存在拟合控制点数量少、标定靶标制造难度大以及标定过程复杂等,针对上述问题,本文提出一种基于二维靶标的双线结构光平面标定方法。该方法采用高精度快速位姿估计(EPnP)算法解算出相机与二维靶标平面之间的位姿关系,获得靶标平面在相机坐标系中的平面方程;依据相机的线面模型,解算出靶标平面上所有的拟合控制点集,在此基础上对上述点集进行去噪处理并使用特征值法对拟合控制点集进行拟合。该方法所需的二维靶标制造简单、精度高、维护和现场操作方便,更重要的是相对于传统方法易于获得丰富的拟合控制点,并能够对拟合控制点进行去噪处理,有益于提高结构光平面的标定精度及鲁棒性。

1 线结构光重建模型

线结构光三维测量系统主要由工业相机与激光器组成,如图1所示,其中 $O_c-X_cY_cZ_c$ 表示相机坐标系,

$O-UV$ 表示图像坐标系。设激光器发射的光平面1与蒙皮对缝边缘的干涉端点 P 在相机坐标系下表示 (x_c, y_c, z_c) ,其在图像坐标系中的投影点 p 的坐标为 (u, v) ,由针孔相机成像模型可得 P 点与 p 点之间的对应关系为^[12]

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, f_x, f_y, u_0, v_0 为相机内参数。设由激光器发射出的光平面1在相机坐标系下的光平面方程可表示为

$$A_1x_c+B_1y_c+C_1z_c+D_1=0 \quad (2)$$

式中, A_1, B_1, C_1 和 D_1 是结构光平面方程参数。依据相机的线面模型,联立式(1)与(2)可对图像中 p 点进行深度重建,获取其在相机坐标系中的对应空间点 P 的坐标。

使用线结构光重建模型恢复测量图像中相关特征的深度信息并代入蒙皮对缝测量模型,即可实现对蒙皮对缝间隙与阶差的测量。由图1可得,测量模型所需的特征都在光平面上,如光平面1与蒙皮对缝边缘的干涉特征点 P ,故而对光平面进行高精度、高鲁棒性的标定是保证蒙皮对缝测量精度的基础。

2 基于二维靶标的双线结构光标定方法

线结构光平面与二维靶标平面干涉后形成的光条

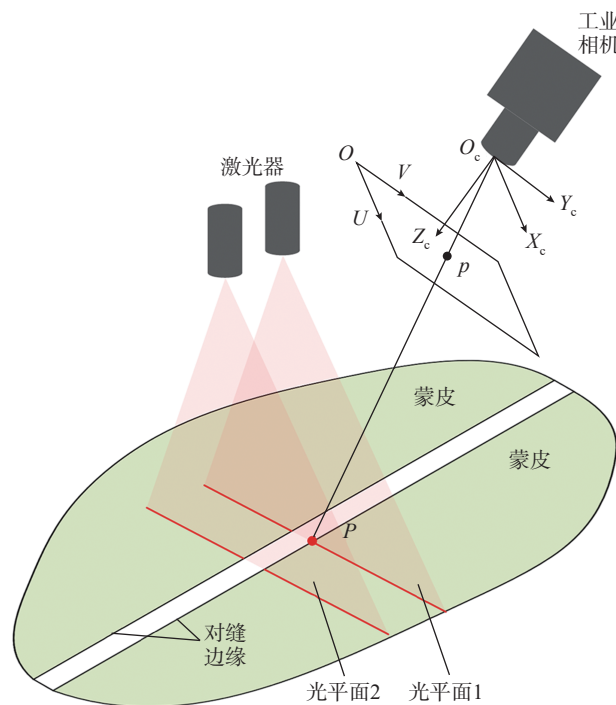
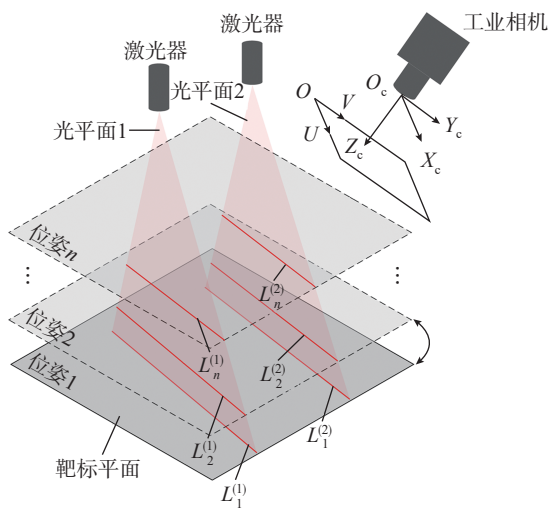


图1 线结构光重建模型示意图

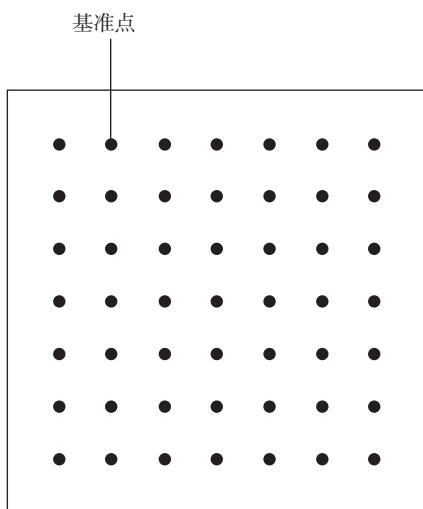
Fig.1 Diagram of line structured light reconstruction model

图案必在靶标平面上,如图2(a)所示,故依据相机与靶标平面的线面模型可重建出干涉光条的空间坐标。重建后的干涉光条以空间点集的形式存在,如图2(a)中的空间点集 $L_1^{(1)}$ 与 $L_1^{(2)}$ 。

获取靶标平面在相机坐标系下的平面方程是对干涉光条进行重建的前提,为此本文以二维靶标平面上的基准点为输入,如图2(b)所示,构建靶标平面位姿计算模型,实现对靶标平面位姿的解算。在此基础上变换二维靶标位姿,获取多组光条重建点集,如图2(a)中 $L_1^{(1)}$ 、 $L_1^{(2)}$ 、 $L_2^{(1)}$ 、 $L_2^{(2)}$ 、 \dots 、 $L_n^{(1)}$ 、 $L_n^{(2)}$;拟合属于同一光平面的空间点集,即可获得该光平面在相机坐标系下的平面方程,实现对其的标定。图3为双线结构光标定流程示意图。



(a) 标定原理示意图



(b) 二维标定靶标示意图

图2 结构光标定原理示意图
Fig.2 Diagram of structured light calibration

2.1 靶标平面在相机坐标系下的位姿计算

图4为相机与靶标平面之间位姿计算的原理图。以靶标平面上的基准点 O_w 为原点,沿靶标平面的边缘分别为 X 轴与 Y 轴, Z 轴垂直于靶标平面,建立靶标坐标系,并令世界坐标系与靶标坐标系相重合。在世界坐标系中使用4个虚拟控制点来表示靶标平面上所有基准点。设4个虚拟控制点为 $\{V_i^{(w)}, i=1,2,3,4\}$,其在世界坐标系下的非齐次坐标为 $V_i^{(w)}=[x_i^{(w)}, y_i^{(w)}, z_i^{(w)}]$;靶标平面上的基准点 $\{P_k^{(w)}, k=1,2,\dots,n\}$ 在世界坐标系下的非齐次坐标为 $P_k^{(w)}=[x_k^{(w)}, y_k^{(w)}, z_k^{(w)}]$ 。靶标平面基准点的坐标与虚拟控制点坐标之间的关系为

$$P_k^{(w)} = \sum_i^4 a_{ki} V_i^{(w)}, i=1,2,3,4 \quad (3)$$

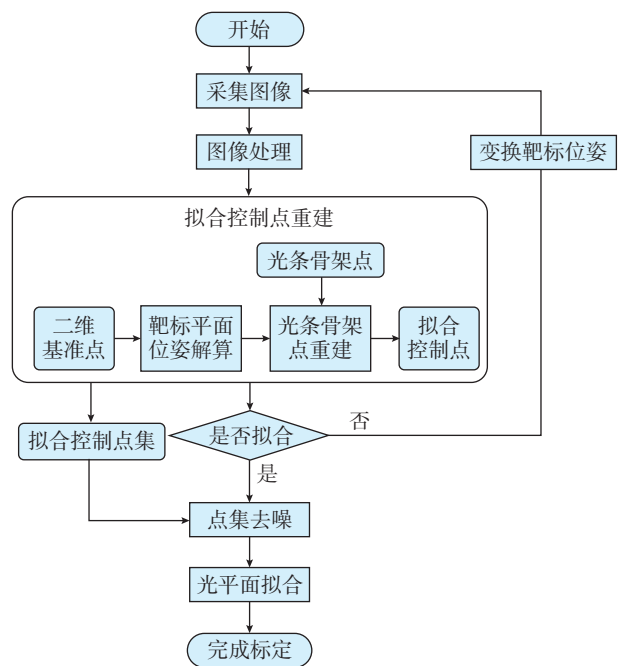


图3 标定流程图

Fig.3 Calibration flow chart

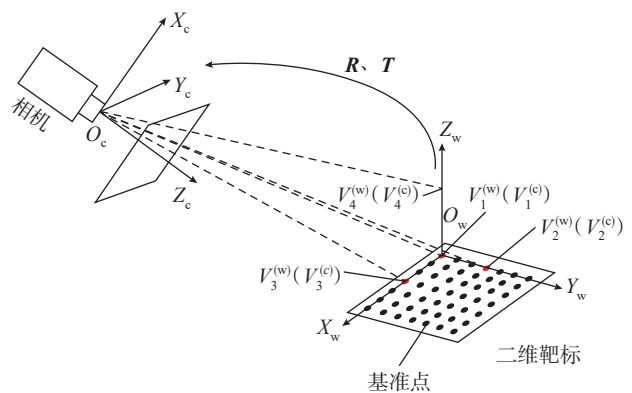


图4 位姿计算原理示意图

Fig.4 Diagram of pose calculation principle

从世界坐标系到相机坐标系之间的转化为刚体变换,故可以得到在相机坐标系下,虚拟控制点与基准点之间的转换关系为

$$P_k^{(c)} = \sum_{i=1}^4 a_{ki} V_i^{(c)}, i=1,2,3,4 \quad (4)$$

式中, $P_k^{(c)}$ 表示靶标平面上的基准点在相机坐标系中的坐标; $V_i^{(c)}$ 表示虚拟控制点在相机坐标系中的对应坐标; a_{ki} 表示虚拟控制点与基准点之间的转换系数,其满足 $\sum_{i=1}^4 a_{ki}=1$ 。

靶标平面上的基准点 $P_k^{(w)}$ 在图像坐标系中对应点的坐标为 $P_k = (u_k, v_k)$, 根据针孔相机模型可得 $P_k^{(w)}$ 在相机坐标系中的坐标值 $P_k^{(c)}$ 与 P_k 之间的转换关系为

$$s_k \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{bmatrix} = KP_k^{(c)} = K \sum_{i=1}^4 a_{ki} V_i^{(c)} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 a_{ki} \begin{bmatrix} x_i^{(c)} \\ y_i^{(c)} \\ z_i^{(c)} \end{bmatrix}, \quad i = 1,2,3,4 \quad (5)$$

式中, s_k 为比例因子; K 为通过离线标定获取的相机内参; f_x, f_y, u_0, v_0 为相机内参数。由式(5)可得靶标平面上的基准点与其对应像点之间的转换关系为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 a_{ki} f_x x_i^{(c)} + a_{ki} (u_x - u_k) z_i^{(c)} = 0 \\ \sum_{i=1}^4 a_{ki} f_y y_i^{(c)} + a_{ki} (v_y - v_k) z_i^{(c)} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将靶标平面上的4个虚拟控制点在相机坐标系下的坐标与像素坐标相对应,可得到一个线性方程组为

$$MX=0 \quad (7)$$

式中, M 是 8×12 的矩阵; 向量 $X=[V_1^{(c)T}, V_2^{(c)T}, V_3^{(c)T}, V_4^{(c)T}]^T$ 是由4个虚拟控制点在相机坐标系下的非齐次坐标构成的 12×1 的列向量; 通过分析 $M^T M$ 的零特征向量^[13], 可解算出虚拟控制点在相机坐标系下的坐标, 从而将3D-2D的PnP问题转换为3D-3D的ICP问题; 通过使用SVD方法可解算出相机坐标系和世界坐标系之间的转换关系^[14-15]。

使用李代数 ξ 表示EPnP方法获取的相机坐标系与棋盘格坐标系之间的转换关系 R, T (其中 R 表示两坐标系之间的旋转矩阵, T 表示两坐标系之间的平移矩阵); 以 ξ 为变量建立的重投影误差模型为

$$\xi^* = \arg \min_{\xi} \frac{1}{2} \sum_k^n \left\| P_k' - \frac{1}{s_k} \exp(\hat{\xi}) P_k^{(w)'} \right\| \quad (8)$$

式中, P_k' 表示图像坐标系中基准点 $P_k = (u_k, v_k)$ 的齐次坐标; $P_k^{(w)'}$ 表示基准点在世界坐标系中的齐次坐标。

通过调整位姿变量 ξ 来使重投影误差和 ξ^* 最小, 从而获取最优位姿参数^[16-17]。

2.2 拟合控制点在相机坐标系下坐标解算

获取相机坐标系与世界坐标系之间的转换关系 R, T 后, 即通过

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

可获取靶标平面上的基准点在相机坐标系下的坐标, 进而可拟合出基准点所在的 φ 平面(图5)在相机坐标系中的平面方程为

$$A_{\varphi} X_c + B_{\varphi} Y_c + C_{\varphi} Z_c + D_{\varphi} = 0 \quad (10)$$

线激光器投射的光平面与靶标平面干涉后在 φ 平面上形成一条直线干涉光条 L , 通过图像处理, 可在图像坐标系中获得呈直线分布的光条骨架点集 $\{P_k^{(l)}, k=1,2,\dots,n\}$ 。由式(1)可知, 图像中的任意像素点对应着相机坐标系中的一条射线, 无法获取具体的空间坐标。

由于图像中的干涉光条是线激光器投射的光平面与 φ 平面干涉后形成, 故光条骨架点对应的拟合控制点必在 φ 平面上。联立式(1)与(10), 可计算图像中光条骨架点在相机坐标系中的三维坐标为

$$\begin{cases} X_c = \frac{(u - u_0) Z_c}{f_x} \\ Y_c = \frac{(v - v_0) Z_c}{f_y} \\ Z_c = \frac{-D_{\varphi} f_x f_y}{A_{\varphi} f_y (u - u_0) + B_{\varphi} f_x (v - v_0) + C_{\varphi} f_x f_y} \end{cases} \quad (11)$$

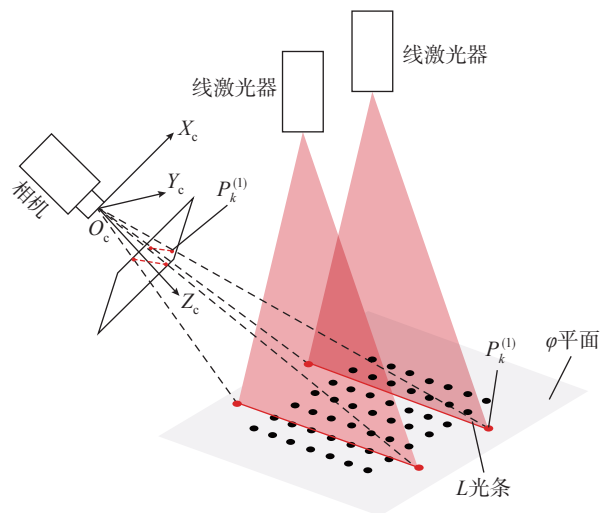


图5 光条重建示意图

Fig.5 Reconstruction of light stripe

将图像中的光条骨架点集按照上述模型进行深度重建,即可获取当前靶标位姿下的两根光条对应的拟合控制点集 $L_i^{(1)}$ 和 $L_i^{(2)}$ 。

2.3 基于特征值法的光平面拟合

将二维靶标变换 n 个位姿,并对图像中的干涉光条进行重建,即可获得拟合控制点集 $L_i^{(1)}, L_i^{(2)}, i=1, 2, \dots, n$ 。由于图像噪声等因素的影响,上述拟合控制点集中存在部分噪声点;最小二乘法的平面拟合精度受噪声点影响较大,难以满足光平面拟合的需求。针对上述问题,使用特征值方法同时考虑拟合控制点 x, y, z 3 个方向的误差来拟合平面;与此同时使用 RANSAC 方法对拟合控制点集进行多轮迭代去噪,降低噪声对平面拟合精度的影响^[18-19]。

2.3.1 光平面拟合

结构光光平面在相机坐标系下的平面方程可由式(2)表示;设光平面 1 的拟合控制点为 $\{(X_{c_j}, Y_{c_j}, Z_{c_j}), j=0, 1, 2, \dots, m\}$,要想获得最佳拟合平面,则应在 $A_1^2+B_1^2+C_1^2=1$ 的条件下满足式(12)。

$$e = \sum_j^m d_j^2 = \sum_j^m (A_1 X_{c_j} + B_1 Y_{c_j} + C_1 Z_{c_j} + D_1)^2 \rightarrow \min \quad (12)$$

使用拉格朗日乘数法,组成函数,即

$$f = \sum_j^m d_j^2 - \lambda (A_1^2 + B_1^2 + C_1^2 - 1) \quad (13)$$

将式(13)分别对 A_1, B_1, C_1 求导并令导数为 0,从而获得特征值方程为

$$\begin{bmatrix} \sum_j^m \Delta X_{c_j} \Delta X_{c_j} & \sum_j^m \Delta X_{c_j} \Delta Y_{c_j} & \sum_j^m \Delta X_{c_j} \Delta Z_{c_j} \\ \sum_j^m \Delta X_{c_j} \Delta Y_{c_j} & \sum_j^m \Delta Y_{c_j} \Delta Y_{c_j} & \sum_j^m \Delta Y_{c_j} \Delta Z_{c_j} \\ \sum_j^m \Delta X_{c_j} \Delta Z_{c_j} & \sum_j^m \Delta Y_{c_j} \Delta Z_{c_j} & \sum_j^m \Delta Z_{c_j} \Delta Z_{c_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)中 λ 表示矩阵的特征值,将 $A_1^2+B_1^2+C_1^2=1$ 代入式(14)可得

$$\lambda = \sum_j^m d_j^2 \quad (15)$$

由式(15)可得,当 λ 最小时所对应的特征向量就是光平面 1 的平面方程参数 A_1, B_1, C_1 ,同理可获得光平面 2 的平面方程参数。

2.3.2 拟合控制点集去噪处理

由于图像噪声等因素的影响,重建后的拟合控制点集周边存在着大量噪声点。为进一步降低噪声点对平面拟合精度的影响,本文设计基于平面模型的 RANSAC

去噪算法。以图 6 中的拟合控制点集为例,其具体拟合步骤如下。

(1)采集 9 组标定图片,在当前相机坐标系下与之对应,同一光平面可获得 9 条呈线性分布的拟合控制点集。在上述点集中随机选出 3 个点,组成大小为 27 的初始点集 S ,对点集 S 使用特征值法拟合初始平面方程,设其为

$$A_s X_{c_j} + B_s Y_{c_j} + C_s Z_{c_j} + D_s = 0 \quad (16)$$

(2)计算所有拟合控制点到初始平面的距离,为

$$d_j = \frac{|A_s X_{c_j} + B_s Y_{c_j} + C_s Z_{c_j} + D_s|}{\sqrt{A_s^2 + B_s^2 + C_s^2}}, j=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

(3)计算 d_j 的标准差 σ ,为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_j^m (d_j - \bar{d})^2}{m-1}} \quad (18)$$

式中, $\bar{d} = \frac{1}{m} \sum_j^m d_j$ 。设过滤阈值 $t=2\sigma$,当 $d_j > t$ 时,将该点定义为外点,当 $d_j \leq t$ 时将其定义为内点,统计每个初始平面的内点数量 M 。

(4)重复步骤(1)~(3),设置迭代次数为 iter;以 M 值最大时的 t 值为阈值,提取内点点集设为 S_f 。

(5)使用特征值法拟合点集 S_f ,获取待拟合平面方程。

由图 6 可以看出,去除噪声后拟合的平面能够更好地贴合拟合控制点集。表 1 为去噪前后的平面拟合参数对比,可得,去噪后平面的和方差(SSE)为 23.53,相较于去噪前平面降低了 77.83;去噪后平面的确定系数

· 拟合内点 · 噪声点 ■ 去噪后拟合平面 ■ 去噪前拟合平面

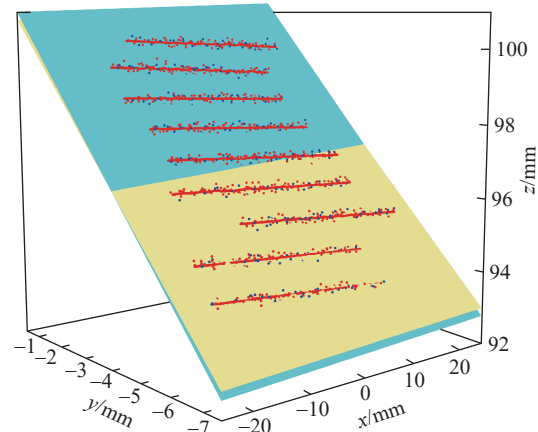


图 6 拟合平面对比
Fig.6 Comparison of fitting plane

(R^2)为 0.9991,相较于去噪前提高了 0.0068。

3 试验与分析

3.1 标定试验

试验采用大恒图像的 MER-502-79U3C 水星工业相机,分辨率为 2448 pixel × 2048 pixel,镜头为 Computar M0814-MP2。线激光器的波长为 635 nm,输出单个光平面,出光夹角为 60°。使用两个单线激光器以及一台工业相机组成蒙皮对缝测量试验平台,如图 7 所示。

使用张正友相机标定算法对相机进行离线标定,得到其标定参数如表 2 所示。

试验过程中保持双线结构光测量平台固定不变,调整相机视野中的靶标平面的位姿,拍摄 9 组试验图像。为了保证图像中靶标平面上的基准点与光条骨架提取的精度,对同一位姿的靶标平面进行不同曝光采集;具体做法如下。

(1) 打开激光器,将相机曝光时间调整为 30 μs ,采集激光器投射的光平面与靶标平面干涉后形成的光条图像。

(2) 关闭激光器,将相机曝光时间调整为 10000 μs ,采集靶标平面图像。图片采集完成后,对光条图片进行处理,提取出图像中离散的亚像素光条骨架点,随后提取靶标图片中的像素基准点;设靶标坐标系与世界坐标

表 1 平面拟合参数对比

Table 1 Comparison of plane fitting parameters

平面类型	和方差	确定系数
未去噪	101.36	0.9923
去噪后	23.53	0.9991

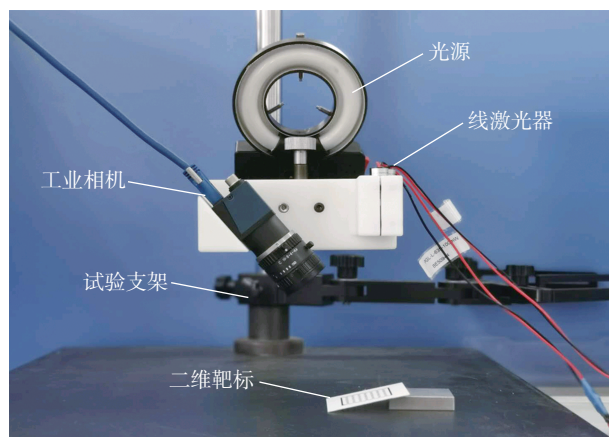


图 7 试验平台

Fig.7 Experimental platform

系重合,定义世界坐标系中 $V_1^{(w)}=[1,0,0]$, $V_2^{(w)}=[0,1,0]$, $V_3^{(w)}=[0,0,1]$, $V_4^{(w)}=[0,0,0]$ 这 4 个点为虚拟控制点;通过 EPnP 算法计算出各个位姿中靶标坐标系与相机坐标系之间的转换关系,如表 3 所示。

通过上述靶标坐标系与相机坐标系之间的转换关系,可以获得靶标平面上的基准点在相机坐标系中的空间坐标;进而可获得各个位姿下靶标平面在相机坐标系中的平面方程,从而将基准点扩展为基准面,其平面参数如表 4 所示。

对采集的原始光条图像进行处理,获取光条骨架在图像坐标系中的像素点集,重建上述点集,即可获得光平面拟合控制点集。使用 RANSAC 算法对属于同一光平面的控制点集进行去噪处理,迭代次数为 100 次,最后使用特征值法拟合所有内点,获取待标定光平面方程,如图 8 所示。

传统的标定方法中,基于三点透视的结构光标定算法^[4]能够同时标定两个结构光光平面,且与本方法一样,都是基于二维靶标对结构光光平面进行标定,故选

表 2 相机标定参数

Table 2 Camera calibration parameters

名称	标定参数
内参数	$\begin{bmatrix} 2433.689 & 0 & 1243.248 \\ 0 & 2438.836 & 1047.111 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
切向畸变参数	$K_1=-0.139, K_2=-0.188, K_3=-0.108$
径向畸变参数	$P_1=0, P_2=0$

表 3 靶标坐标系与相机坐标系之间的转换关系

Table 3 Transformation relationship between target coordinate system and camera coordinate system

位姿	旋转向量	平移向量
1	$[-0.546, -0.520, -1.505]$	$[-0.616, 0.478, -97.292]$
2	$[-0.544, -0.519, -1.500]$	$[-1.249, -1.811, -97.869]$
3	$[-0.543, -0.522, -1.507]$	$[-0.120, 4.738, 91.262]$
4	$[-0.602, -0.397, -1.161]$	$[-0.602, -0.014, 93.861]$
5	$[-0.608, -0.371, -1.087]$	$[-0.928, -7.036, 98.254]$
6	$[-0.520, -0.544, -1.505]$	$[6.915, -6.613, 96.546]$
7	$[-0.521, -0.547, -1.513]$	$[-4.133, -5.041, 94.159]$
8	$[-0.532, -0.561, -1.522]$	$[-5.235, -1.909, 90.378]$
9	$[-0.541, -0.573, -1.546]$	$[-4.983, -2.913, 89.688]$

用三点透视标定方法与本文中的方法进行对比。两种方法的标定结果如表 5 所示。

3.2 标定精度验证对比试验

(1) 蒙皮对缝间隙阶差测量模型。如图 9 所示, $P_1、P_2、P_3、P_4$ 为结构光平面与蒙皮对缝边缘干涉后形成

表 4 靶标平面在相机坐标系中的平面方程

Table 4 Plane equation of target plane in camera coordinate system

位姿	$AX+BY+CZ+D=0$			
	A	B	C	D
1	0.014	0.629	0.777	76.880
2	0.016	0.629	0.771	75.879
3	0.013	0.628	0.777	74.964
4	0.014	0.629	0.777	73.907
5	0.014	0.628	0.778	72.993
6	0.012	0.626	0.780	72.223
7	0.014	0.629	0.778	71.007
8	0.013	0.630	0.776	69.871
9	0.012	0.629	0.774	68.932

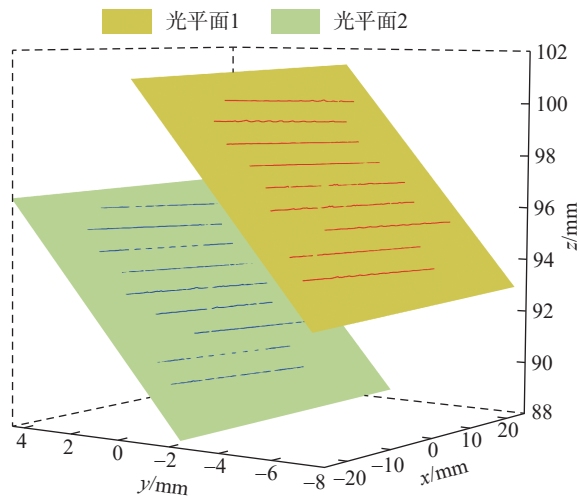


图 8 光平面拟合图

Fig.8 Picture of fitting results of light plane

表 5 结构光光平面方程

Table 5 Plane equation of structured light

序号	本文方法	三点透视方法
1	$0.004X+0.780Y-0.626Z+62.924=0$	$0.006X+0.831Y-0.534Z+64.236=0$
2	$0.001X+0.770Y-0.637Z+57.331=0$	$0.003X+0.798Y-0.623Z+59.365=0$

的特征点,通过对测量原始图片进行处理,提取干涉特征点在图像坐标系中的坐标并将其代入式(1)和(2),即可重建出相应特征点在当前相机坐标系下的空间坐标。在空间点 P_1 和 P_2 一侧取 n 个骨架点并设为 $\{P_{\alpha 1}, P_{\alpha 2}, \dots, P_{\alpha n}\}$,在空间点 P_3 和 P_4 一侧取 n 个骨架点并设为 $\{P_{\beta 1}, P_{\beta 2}, \dots, P_{\beta n}\}$;使用点集 $\{P_{\alpha 1}, P_{\alpha 2}, \dots, P_{\alpha n}\}$ 拟合 α 平面,使用点集 $\{P_{\beta 1}, P_{\beta 2}, \dots, P_{\beta n}\}$ 拟合 β 平面;分别计算点集 $\{P_{\alpha 1}, P_{\alpha 2}, \dots, P_{\alpha n}\}$ 到 β 平面的距离,点集 $\{P_{\beta 1}, P_{\beta 2}, \dots, P_{\beta n}\}$ 到 α 平面的距离,通过求取上述距离的均值即可获得蒙皮的对缝阶差,为

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{2n} h_i}{2n} \quad (19)$$

设向量 V_b 表示蒙皮对缝边缘的方向,干涉光条的直线方向为 V_1 ,由此可得干涉光条与对缝边缘之间的夹角 θ 为

$$\theta = \arccos \frac{V_b \cdot V_1}{|V_b| |V_1|} \quad (20)$$

点 P_1 与点 P_4 之间的距离和点 P_2 与 P_3 点之间的距离相等并将其设为 s ;通过式(19)可计算出对缝的阶差 h ,从而得出对缝间隙为

$$d = \sqrt{s^2 - h^2} \times \sin\theta \quad (21)$$

(2) 标定精度验证。为验证本文中提出的结构光系统标定算法的标定精度,设计对缝测量标准块(图 10)。标准块制造完成后,使用先临三维高精度蓝光扫描检测系统(测量精度 $5 \mu\text{m}$)对其进行复测,选取试验件中 8 条对缝进行试验,试验对缝的实测结果如表 6 所示。

使用表 5 中的两组标定参数分别对标准块进行测量试验。每组试验测量 8 条对缝,每条对缝分别进行 20 次采样测量,试验结果如图 11、表 7 和 8 所示。

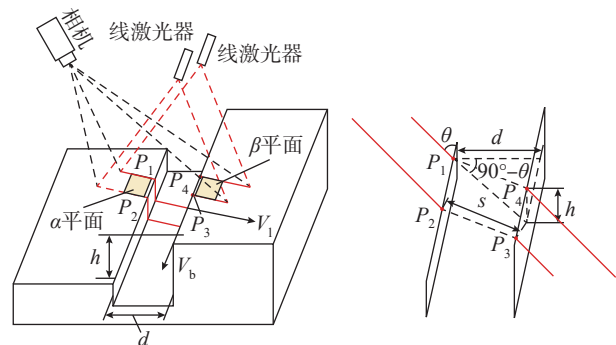


图 9 对缝间隙与阶差解算模型

Fig.9 Calculation model of seam gap and seam flush

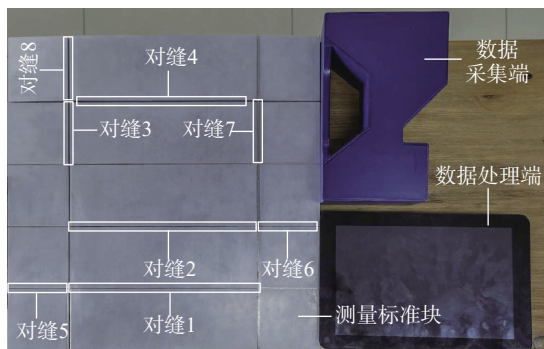


图 10 精度验证系统
Fig.10 Accuracy verification system

表 6 对缝测量标准块实测数据

Table 6 Measured data of standard block for seam gap measurement mm

对缝组别	间隙	阶差
对缝 1	0.494	0.012
对缝 2	1.012	0.006
对缝 3	2.010	0.492
对缝 4	2.001	0.012
对缝 5	0.476	0.501
对缝 6	1.006	0.505
对缝 7	2.011	0.496
对缝 8	2.003	0.436

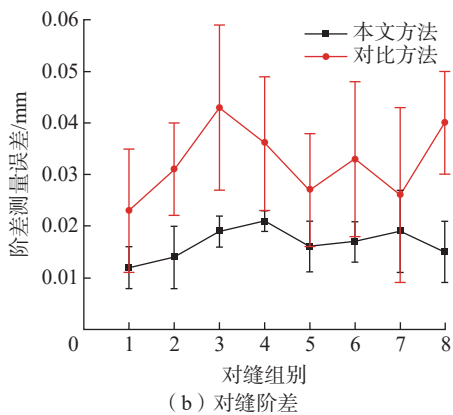
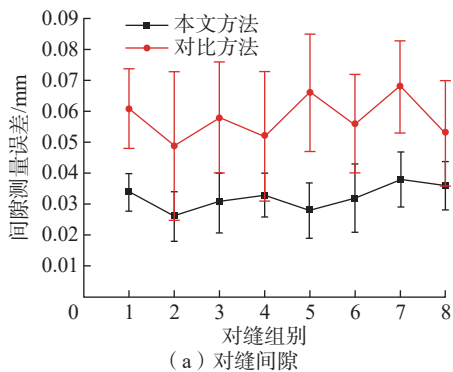


图 11 对缝间隙与阶差测量误差

Fig.11 Measurement error bar of seam gap and seam flush

表 7 对缝间隙试验结果

Table 7 Seam gap experiment results mm

对缝组别	平均值		误差		标准差	
	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法
对缝 1	0.528	0.555	0.034	0.061	0.006	0.013
对缝 2	0.986	1.061	0.026	0.049	0.008	0.024
对缝 3	2.041	2.068	0.031	0.058	0.010	0.018
对缝 4	2.034	1.949	0.033	0.052	0.007	0.021
对缝 5	0.504	0.542	0.028	0.066	0.009	0.019
对缝 6	1.038	1.062	0.032	0.056	0.011	0.016
对缝 7	1.973	1.943	0.038	0.068	0.009	0.015
对缝 8	2.039	2.056	0.036	0.053	0.008	0.017

表 8 对缝阶差试验结果

Table 8 Seam flush experiment results mm

对缝组别	平均值		误差		标准差	
	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法
对缝 1	0.024	0.035	0.012	0.023	0.004	0.012
对缝 2	0.020	0.037	0.014	0.031	0.006	0.009
对缝 3	0.473	0.449	0.019	0.043	0.003	0.016
对缝 4	0.033	0.048	0.021	0.036	0.002	0.013
对缝 5	0.517	0.474	0.016	0.027	0.005	0.011
对缝 6	0.522	0.538	0.017	0.033	0.004	0.015
对缝 7	0.477	0.470	0.019	0.026	0.008	0.017
对缝 8	0.451	0.476	0.015	0.040	0.006	0.010

由表 7 和 8 可知,使用本文所提方法标定后的系统的蒙皮对缝间隙测量精度优于 0.050 mm,对缝阶差的测量精度优于 0.030 mm;而基于三点透视方法标定后的系统的对缝间隙测量精度优于 0.090 mm,对缝阶差的测量精度优于 0.060 mm。对比可得,对缝间隙的测量精度提高了 0.040 mm,对缝阶差测量精度提高了 0.030 mm。与此同时,由图 11 可得,使用本文所提方法标定后的系统在测量稳定性方面也有所提高。

4 结论

传统光平面标定方法仅利用靶标上有限的基准点来获取光平面拟合控制点,从而导致拟合控制点数量较少,且空间分布规律受光条图像处理算法的影响较大。本文以靶标平面上的基准点为输入,基于 EPnP 算法构建靶标平面姿态计算模型,深入挖掘基准点所包含的位姿信息,将靶标平面上的基准点信息转换为基准面

信息。在此基础上,依据线面约束,将当前位姿下靶标平面上的所有光条特征转换为拟合控制点。变换标定板位姿,即可获得丰富的光平面拟合控制点;对上述拟合控制点进行迭代去噪处理,并同时考虑多个方向上的误差来拟合待标定光平面,减少了噪声对拟合精度的影响,提高了光平面拟合的鲁棒性。在实验室环境中对测量标准块进行测量试验,试验表明,使用本文所述的方法标定后的双线对缝测量系统的间隙重复测量精度优于 0.050 mm,阶差重复测量精度优于 0.030 mm,相对于三点透视标定方法的测量结果有较大幅度的提高,能够满足实际场景的使用需求。

参考文献

- [1] 丁祖娇. 面向结构光对缝测量的光条细化方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- DING Zujiao. Light bar thinning method for structural light alignment measurement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [2] 许大帅, 杜福洲. 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 77-81.
- XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structural light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.
- [3] 周富强, 蔡斐华. 基于一维靶标的结构光视觉传感器标定 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 7-12.
- ZHOU Fuqiang, CAI Feihua. Calibrating structured-light vision sensor with one-dimensional target[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 7-12.
- [4] 韩建栋, 吕乃光, 董明利, 等. 线结构光传感系统的快速标定方法 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 958-963.
- HAN Jiandong, LÜ Naiguang, DONG Mingli, et al. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 958-963.
- [5] WEI Z Z, LI C Q, DING B S. Line structured light vision sensor calibration using parallel straight lines features[J]. Optik, 2014, 125(17): 4990-4997.
- [6] WU Q Y, SU X Y, HUI B, et al. New calibration approach for light stripe sensor[C]//SPIE Proceedings of the 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment. Chengdu, 2007.
- [7] ZHOU F Q, ZHANG G J. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 59-67.
- [8] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration n of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[J]. Society of Manufacturing Engineers, 1988, 49: 5-13.
- [9] 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 108-110.
- DUAN Fajie, LIU Fengmei, YE Shenghua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 108-110.
- [10] 陈天飞, 马孜, 吴翔. 基于主动视觉标定线结构光传感器中的光平面 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 256-263.
- CHEN Tianfei, MA Zi, WU Xiang. Calibration of light plane in line structured light sensor based on active vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 256-263.
- [11] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 7-17.
- ZHANG Xi, ZHANG Jian. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 7-17.
- [12] ARBABMIR M, EBRAHIMI M. Simultaneous filter tuning and calibration of the camera and inertial measurement unit camera for a vision inertial navigation system[J]. IET Image Processing, 2020, 14(12): 2756-2767.
- [13] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [14] 汪佳宝, 张世荣, 周清雅. 基于视觉 EPnP 加权迭代算法的三维位移实时测量 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 166-175.
- WANG Jiabao, ZHANG Shirong, ZHOU Qingya. Vision based real-time 3D displacement measurement using weighted iterative EPnP algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 166-175.
- [15] 张慧娟, 熊芝, 劳达宝, 等. 基于 EPNP 算法的单目视觉测量系统研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 517005.
- ZHANG Huijuan, XIONG Zhi, LAO Dabao, et al. Monocular vision measurement system based on EPNP algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 517005.
- [16] 高翔, 张涛, 刘毅. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 164-166.
- GAO Xiang, ZHANG Tao, LIU Yi. Fourteen lectures on visual SLAM: From theory to practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 164-166.
- [17] 王昭, 黄军辉, 高建民, 等. 基于光束法平差的线结构光测量系统标定 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 32-40, 48.
- WANG Zhao, HUANG Junhui, GAO Jianmin, et al. Calibration of the structured light measurement system with bundle adjustment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 32-40, 48.
- [18] 孔利, 王延存, 周茂伦, 等. 基于随机抽样与特征值法的点云平面稳健拟合方法 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(3): 43-46.
- KONG Li, WANG Yancun, ZHOU Maolun, et al. A robust point cloud planar fitting method based on random sampling and eigenvalue[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(3): 43-46.
- [19] 李希, 韩燮, 熊风光. 基于 RANSAC 和 TLS 的点云平面拟合 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 123-126, 143.
- LI Xi, HAN Xie, XIONG Fengguang. Plane fitting of point clouds based on RANSAC and TLS[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(1): 123-126, 143.

通讯作者: 黄翔, 教授, 研究方向为飞机数字化装配与测量。

(责编 古京)