

激光与光电子学进展

网格结构光视觉位姿测量系统设计

付鲁华^{1,2*}, 冯菲¹, 王鹏^{1,2}, 孙长库^{1,2}¹天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072;²中航工业洛阳电光设备研究所光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要 针对位姿测量系统会增加被测物重量的问题, 设计了网格结构光的视觉位姿测量系统。提出了一种基于二维平面靶标的网格结构光标定算法, 利用靶标和结构光的共面性, 同时标定网格结构光和相机, 实现被测物表面三维点云的获取。为了验证网格结构光点云测量精度, 进行了结构光标定实验以及点云精度验证实验, 结果表明点云精度在 0.04 mm 以上。研究了点云配准的位姿测量算法。采用采样一致性初始配准(SAC-IA)算法对测量点云与参考点云进行粗配准, 为后续点云精配准提供较好的初始位置。采用改进的迭代闭合点(ICP)算法进行点云精配准, 引入随机采样一致(RANSAC)算法和法向量阈值过滤匹配点, 以点到面的距离为误差函数, 实现位姿测量。进行了点云配准算法对比实验和位姿测量实验, 实验结果证明: 被测物发生旋转运动时, 该系统的最大误差不超过 0.25°; 平移运动时, 最大误差不超过 0.35 mm。

关键词 仪器; 测量与计量; 单目视觉; 网格结构光; 三维测量; 位姿测量; 点云配准

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213307

Design of Visual Pose Measuring System Based on Grid-Structured Light

Fu Luhua^{1,2*}, Feng Fei¹, Wang Peng^{1,2}, Sun Changku^{1,2}¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471009, Henan, China

Abstract To address the problem that the pose measurement system will increase the weight of the measured object, a visual pose measuring system based on grid-structured light is developed. First, grid-structured light is used to obtain the 3D point cloud on the surface of an object. A grid-structured-light calibration algorithm based on a 2D target is proposed. Based on the coplanarity of the target and the structured light, the grid-structured light and a camera can be calibrated simultaneously. To verify the accuracy of the point cloud obtained by the grid-structured light, structured-light calibration and point-cloud accuracy measuring experiments are conducted. The results show that the point cloud accuracy is above 0.04 mm. Moreover, the point-cloud registration algorithm for pose measurement is studied. The sample consensus initial alignment (SAC-IA) algorithm is used for coarse registration because it provides a good initial position for fine point-cloud registration. The improved iterative closet point (ICP) algorithm is used for fine registration and random sample consensus (RANSAC) algorithm and a normal vector threshold are introduced to filter matching points. The distance from the point to the surface is used as the error function to perform pose measurements. Registration algorithm comparison and pose measurement experiments are conducted. The results prove that when the measured object is in rotational motion, the maximum error of the system does not exceed 0.25° and in translational motion, the maximum error does not exceed 0.35 mm.

Key words instruments, measurement and metrology; monocular vision; grid-structured light; three-dimensional measurement; pose measurement; point registration

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-02-04; 录用日期: 2022-02-28; 网络首发日期: 2022-03-10

基金项目: 中航工业洛阳电光设备研究所光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(201951048001)

通信作者: *fuluhua@tju.edu.cn

1 引言

目前,常用的位姿测量方法有机械法、电磁法和图像处理法等。其中,机械法和电磁法需要在被测物上安装机械连杆或电磁接收器等设备,导致被测物重量的增加。被测物重量的增加会一定程度上影响被测物运动的灵活性,如飞行员头盔上的位姿测量系统。依据我国标准《GJB 1564A—2012 飞行保护头盔通用规范》,如果飞行员头盔重量增加,会导致飞行员的飞行耐受时间降低,增加飞行员飞行负担。而基于图像处理的视觉位姿测量方法,无需在被测物上额外安置繁重的硬件设施,抗干扰能力强,且能够准确实现位姿测量,具有较大的实用价值。英国 BAE 公司研发的 Striker II^[1] 头盔采用了图像处理的位姿测量方法,通过在头盔表面布置多组 LED 作为标识点,实现位姿测量。但这种方法仍会微小增加被测物的重量,针对这个问题,本文设计了基于网格结构光的位姿测量系统,利用网格结构光获取被测物表面测量点云,结合点云配准算法,实现位姿测量。该系统无需在被测物上安置任何设备。

基于结构光的三维测量是一种非接触式测量方法,采用投射装置向被测物体投射特定形式的结构光,并拍摄被测物体表面调制而发生形变的结构光图像,从图像中提取结构光的形变信息并计算出被测物体表面的三维形貌特征。根据投射图案的不同,结构光可以分为点结构光、线结构光^[2]、面结构光^[3-4]以及网格结构光^[5-6]等。其中,点、线结构光只能采集到单点或单线的点云,需要结合扫描技术来获取更大范围的离散点云。面结构光如光栅,采用相移轮廓术和傅里叶变换轮廓术等相位测量技术,可以获得高精度测量点云,但点云密度太大,点云配准所需时间较长,不适合位姿测量场景。网格结构光由 Will 等^[7]于 1972 年提出,通过投射网格图案或网格编码,实现三维测量。网格结构光覆盖面积大,无需结合扫描设备。孙佳睿^[8]采用双目立体匹配算法采集网格结构光的特征点信息,获取物体三维点云,由于双目公共视场限制,只能测量体积较小的物体。因此,本文采用单目的网格结构光系统测量物体表面三维点云,无需扫描设备,能够采集得到数百个点离散点云。

点云配准的本质是得到两组点云之间的相对位置和姿态变换矩阵,被广泛应用于位姿测量、三维重建等领域。但一般配准过程中的两组点云由同一设备采集得到,点云密度相近。陈学伟等^[9]采用采样一致性初始配准(SAC-IA)算法对两组点云进行初始配准,再采用点到点的迭代闭合点(ICP)算法进行精配准,提高配准精度。鲁荣荣等^[10]采用点到点的 ICP 配准算法求取两帧卫星点云之间的位姿变化,从而求取卫星的运动参数。耿磊等^[11]采用激光雷达和惯性测量单元(IMU)采集三维点云和四元数组,将 IMU 与基于局部

拟合平面的 ICP 配准算法融合,实现点云配准。但本文中,两组点云密度相差较大,传统点到点的配准算法^[12-13]的效果较差,测量精度低。

综上所述,本文采用图像式位姿测量,设计了基于网格结构光的位姿测量系统。提出了一种网格结构光的标定方法,利用一个二维方向性靶标,同时标定网格结构光和相机,获取被测物体表面的测量点云。针对两组数量相差较大的点云,采用 SAC-IA^[14]粗配准和改进的 ICP 精配准结合的算法,引入随机采样一致(RANSAC)算法和法向量阈值过滤无效的匹配点对,以测量点到参考点切平面的距离为误差函数,在保证配准精度的同时,提高了配准的速度,实现了旋转角度和平移量的测量。

2 系统结构设计

系统结构如图 1 所示。测量系统由投影仪和单个 CCD 相机组成。投影仪负责将网格结构光投射在被测物体上,CCD 相机采集图像,提取图像中的网格结构光,采集网格结构光角点。结合 CCD 相机和网格结构光标定结果,将二维结构光角点转化为被测物表面三维点云,实现三维点云的获取。

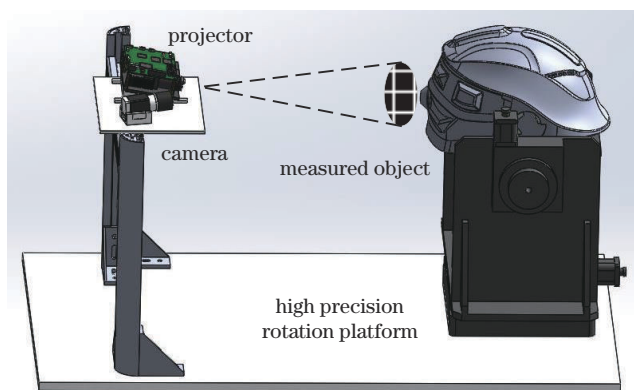


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of system structure

投影仪和 CCD 相机固定在光学平台上,测量时,以相机坐标系为统一坐标系计算被测物三维点云。以物体表面大范围的参考点云为基准,将网格结构光所得的局部测量点云与之做配准,得到测量点云到参考点云的旋转平移矩阵。被测物发生位移时,所采集的三维点云特征随之变化,再次做配准。结合两次配准结果,可以得到此次位移变化的旋转矩阵和平移矩阵,完成位姿测量。

点云配准过程中,测量点云有数百个点,由网格结构光三维测量系统获得。参考点云需要提前采集,一般有数万个点,通过点云处理软件直接将被测物的三维模型转换为点云。为了实现稀疏点云和稠密点云配准,采用 SAC-IA 点云粗配准和改进 ICP 精配准结合的点云配准算法。SAC-IA 粗配准以快速点特征直方

图(FPFH)^[15]描述两组点云的特征,结合RANSAC算法完成初次配准,为改进ICP提供较好的初值。改进ICP采用KD-tree加速匹配点对的搜索,通过RANSAC算法和法向量阈值过滤无效匹配点对,并将点到面的距离作为误差函数,结合线性最小二乘优化迭代计算过程,实现了位姿测量。

3 网格结构光标定及三维点云获取

本节提出了一个简单快捷的网格结构光的标定方法,仅利用一个二维方向性圆形靶标,通过采集不同摆放位置的靶标图像,实现相机和网格结构光的同时标定。

本文采用Zhang氏标定法^[16]进行相机标定,将标定靶标摆放在 N 个不同的方位捕捉图像。靶标图案如图2所示。经解算可以得到相机的内外参数 \mathbf{A}_i 、 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i ,其中, i 表示拍摄的第 i 张靶标图像。完成相机标定,结合相机的小孔成像模型,即可确定第 i 张靶标图像中的点在图像坐标系下的坐标 (u_i, v_i) 与相机坐标系下的坐标 (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) 之间的转换关系。

网格结构光标定是为了获得空间结构光线相对于相机的位置参数关系。标定过程中,为了提高三维测量的效率,仅提取网格结构光的角点,该角点可视为投影仪投出的结构光线与被测目标的交点。相机标定的同时,将网格结构光投射在靶标上,如图2所示,利用 \mathbf{R}_i 、 \mathbf{T}_i 矩阵值构建靶标平面方程。在相机坐标系下, \mathbf{R}_i 的第三列 $(r_{3i}, r_{6i}, r_{9i})^T$ 为靶标平面的法向量,平移向量

$(t_{1i}, t_{2i}, t_{3i})^T$ 为靶标坐标系原点在相机坐标系下的坐标,则可以确定靶标平面在相机坐标系下的方程。设在第 i 张靶标图像中,点 P 为第 k 个网格角点,依据 P 在图像坐标系下的坐标 (u_{ik}, v_{ik}) 与相机坐标系下的坐标 (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) 之间的转换关系,可以联立得到如下方程:

$$\begin{cases} x_{ik} = \frac{(u_{ik} - u_0)z_{ik}}{f_x} \\ y_{ik} = \frac{(v_{ik} - v_0)z_{ik}}{f_y} \\ r_{3i}x_{ik} + r_{6i}y_{ik} + r_{9i}z_{ik} - (r_{3i}t_{1i} + r_{6i}t_{2i} + r_{9i}t_{3i}) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (u_0, v_0) 为相机光心在图像坐标系下的坐标; f_x 和 f_y 分别是相机在 u 和 v 方向上的尺度因子,这4个参数都经过相机标定计算得到。计算式(1),可以得到第 i 张图像中,网格结构光角点 P 在相机坐标系下的坐标 (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) 。

如图2所示,网格结构光角点 P 可视为投影仪投射出的光线 OA 与靶标平面的交点,设光线在三维空间内的方程为

$$\frac{x_{ck} - x_{0k}}{d_{1k}} = \frac{y_{ck} - y_{0k}}{d_{2k}} = \frac{z_{ck} - z_{0k}}{d_{3k}}, \quad (2)$$

式中: (x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}) 表示第 k 条光线经过的一个点,由式(1)求得; (d_{1k}, d_{2k}, d_{3k}) 表示光线的方向向量。网格结构光的标定即可转换为式(2)中未知量 d_{1k} 、 d_{2k} 以及 d_{3k} 的求解。

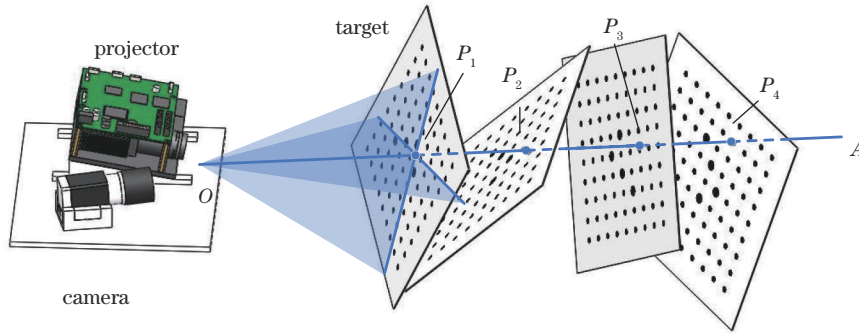


图2 网格结构光的标定

Fig. 2 Calibration of grid-structured light

拍摄 n 张图片,依据式(1),得到 n 组在光线 OA 上的点,即 (x_{1k}, y_{1k}, z_{1k}) 、 (x_{2k}, y_{2k}, z_{2k}) 等,将这些点整合成矩阵 \mathbf{J} 并进行奇异值分解:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} x_{1k} - \bar{x}_k & y_{1k} - \bar{y}_k & z_{1k} - \bar{z}_k \\ x_{2k} - \bar{x}_k & y_{2k} - \bar{y}_k & z_{2k} - \bar{z}_k \\ x_{3k} - \bar{x}_k & y_{3k} - \bar{y}_k & z_{3k} - \bar{z}_k \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T, \quad (3)$$

式中: $(\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k)$ 为 n 组点的平均值; $\mathbf{V} = [d_{1k} \ d_{2k} \ d_{3k}]$,即式(2)的方向向量,实现网格结构光的标定。

在三维测量过程中,将网格结构光投射到被测物表面,结合小孔成像模型和式(2),得到如下表达式:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 - u \\ 0 & f_y & v_0 - v \\ d_{2k} & -d_{1k} & 0 \\ d_{3k} & 0 & -d_{1k} \\ 0 & d_{3k} & -d_{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ck} \\ y_{ck} \\ z_{ck} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_{2k} \cdot x_{0k} - d_{1k} \cdot y_{0k} \\ d_{3k} \cdot x_{0k} - d_{1k} \cdot z_{0k} \\ d_{3k} \cdot y_{0k} - d_{2k} \cdot z_{0k} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

通过最小二乘法拟合方程式(4),即可解算出被测物表面第 k 个网格结构光角点在相机坐标系下的坐标 (x_{ck}, y_{ck}, z_{ck}) ,得到测量点云。根据被测物大小,选用 15×20 的网格结构光,即 $k = 1, 2, \dots, 300$ 。因此,采

集得到的测量点云共有 300 个点。

4 基于点云配准的位姿测量算法

点云配准是使测量点云和参考点云重合的过程,但本文中的测量点云只有 300 个点,而参考点云有上万个点,这增大了点云配准的难度。针对这种情况,本文采用了 SAC-IA 粗配准与改进 ICP 精配准结合的点云配准算法,实现了 300 个点的稀疏测量点云与上万个点的稠密参考点云之间的配准,并获取了位姿信息。

SAC-IA 算法基于点云的局部特征,主要细分为 3 步:利用主成分分析法(PCA)估计点云表面法向量;通过点云表面法向量生成 FPFH,实现点云数据特征描述;利用 RANSAC 算法进行点云数据特征匹配,实现目标点云和参考点云基本重合。

点云精配准算法包括 4 个环节,即选择配准点集、搜索匹配点对、过滤匹配点对以及转换矩阵解算。选择配准点集时,为了提高配准的速度,选择体素网格降采样后的参考点云作为目标点云,而测量点云本身数量较小,可直接作为源点云带入配准计算。同时,采用 KD-tree 进行匹配点对的搜索,提高查找速度。

建立的匹配点对集内,往往存在一部分无效的匹配点对,而这些无效的匹配点对会使转换矩阵的计算产生误差,影响最终的配准精度。稀疏点云与稠密点

云的配准过程中,所能生成的匹配点对数量较少。因此,本文采用 RANSAC 和法向量阈值级联的算法过滤无效的匹配点对,尽可能从匹配点对中筛选出最优匹配点对,提高配准的准确性。

RANSAC 算法从匹配点对集中随机选取数组匹配点对,并求解刚体变换矩阵。计算点集中剩余点对经过该矩阵变换后的距离误差,若误差小于所设阈值,标记为局内点,否则,标记为局外点。重复上述步骤至迭代次数上限,获取数组刚体变换矩阵及其对应的局内点,将局内点对数量最多的集合作为最终的匹配点集。RANSAC 算法能够从数量有限的匹配点对中,进一步筛选出最优匹配点对,但该算法主要基于点对间距离,因此,本文将 RANSAC 算法与法向量阈值法结合,增加对匹配点集的约束,减少误匹配点对精配准结果的影响。

传统的 ICP 精配准算法采用点到点之间的距离作为转换矩阵解算的误差函数,这是由于一般的配准问题中,两个点云数量与密度相当,因此传统 ICP 算法能达到的配准精度较高。但在本文中,测量点云与参考点云数量级相差较大。针对这种情况,基于点对点的 ICP 算法极有可能出现匹配不准确的情况。因此,本文采用测量点 p_i 到参考点 q_i 的切平面距离为迭代目标函数^[17],提高了配准算法的准确度,如图 3 所示, n_i 代表参考点的法向量。

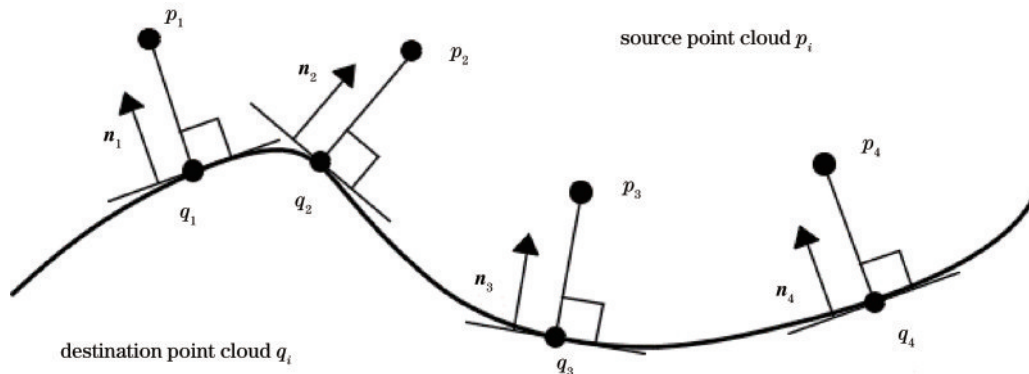


图 3 点到面 ICP

Fig. 3 Point-to-plane ICP

点到面 ICP 的求解过程,可视为求解最优转化矩阵 $[R|T]$,使测量点云到参考点云切平面的误差函数最小,由下式表示:

$$[R|T]_{\text{omp}} = \arg \min_{[R|T]} \sum_i [(R \cdot p_i + T - q_i) \cdot n_i]^2, \quad (5)$$

采用线性最小二乘的方法,求解式(5),得到旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,完成改进 ICP 精配准。

5 实验

为了验证本文提出算法的实践意义以及系统的测量精度是否满足位姿测量的要求,设计了以下实验进行验证。通过相机和网络结构光标定实验验证标定方

法的可行性,测量标准面的位移验证点云测量精度,最后进行位姿测量实验。

搭建如图 4 所示的实验台。投影系统选用 TI 公司的 DLP LightCrafter 4500 投影仪,分辨率为 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$ 。相机系统采用 Hikvision 公司的 MV-CA013-21UM 工业相机,以及焦距为 8 mm、光圈为 F1.3 的 AVENIR LENS 镜头,其中,相机分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1064 \text{ pixel}$ 。位姿测量精度验证实验时,将被测物放置在高精度转台上,转台选用的是卓立汉光 GD22,精度为 0.05° 。根据被测物大小,投射 15×20 的网格结构光。

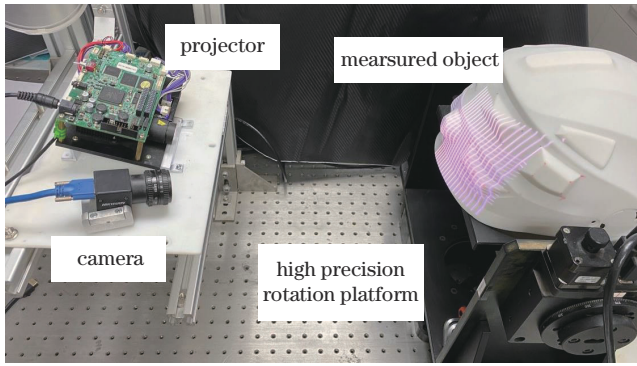


图 4 系统实物图

Fig. 4 Setup of measuring device

5.1 网格结构光标定实验

采用 Zhang 氏标定法标定相机, 拍摄 30 张不同方位的靶标图片, 根据重投影误差筛选出误差较小的 21 张图片, 进行二次标定计算, 提高相机标定精度。标定相机的同时, 将 15×20 的网格结构光投射在靶标上, 拍摄 4 张不同方位的结构光靶标图像, 如图 5 所示。通过形态学变换去除结构光外的图像背景, 获取结构光光条。

采用 Shi-Tomasi 算法^[18]和亚像素级角点提取法提取结构光的角点, 根据相机标定结果进行畸变校正, 结合式(1)计算得到角点在相机坐标系下的坐标。依据 4 张不同位置的结构光图像, 获取 4 组结构光角点在相机坐标系下的坐标, 如图 6 所示。

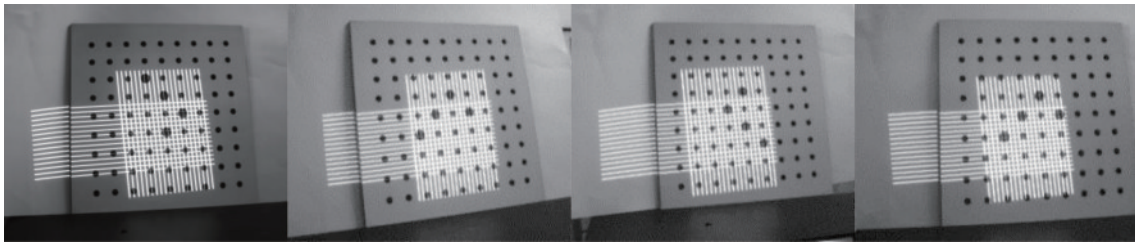


图 5 网格结构光标定图像

Fig. 5 Calibration images of grid-structured light

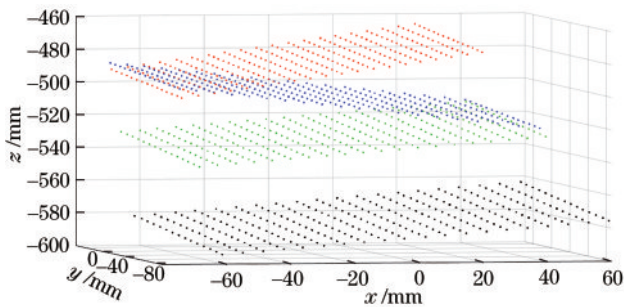


图 6 结构光角点在相机坐标系下的坐标

Fig. 6 Corner points of structured lights in camera coordinate system

根据第 2 节中提出的标定方法计算得到 300 条结构光的空间光线方程, 完成结构光的标定。图 7 和表 1 列出了最终得到的光线标定参数。

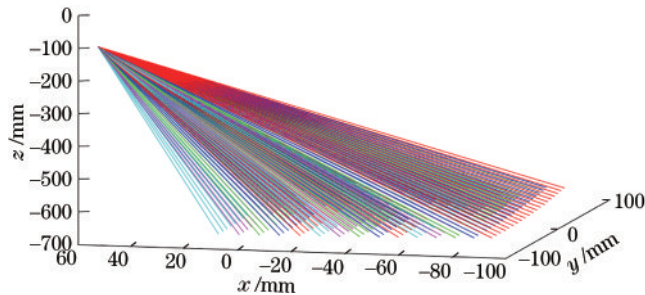


图 7 拟合所得网格结构光光线

Fig. 7 Fitted grid-structured lights

为了验证网格结构光标定的结果, 测量了标准面的位移精度。将平面度较高的氧化铝陶瓷片置于距离

表 1 网格结构光光线方程(局部)

Table 1 Part of grid-structured light equation

x_0	y_0	z_0	d_1	d_2	d_3
			-0.3832	-0.2573	-0.8870
120.60	100.10	-33.14	-0.3717	-0.2588	-0.8915
			-0.3604	-0.2604	-0.8956
		

高精度平移台为 0 处, 平移台采用的是 Mitutoyo 公司的 178-042-1 数显水平工作台, 移动范围为 0~25 mm, 最大载重量 15 kg, 平移精度为 0.001 mm。移动平面, 测量平面点云, 再将平面恢复至初始位置。重复上述步骤 6 次, 每次移动不同距离。将测量得到的平面点云拟合为平面, 测量不同平面之间的距离。表 2 给出了验证精度的结果。实验结果表明, 测量值的最大误差不超过 0.04 mm, 满足点云精度要求。

表 2 点云精度验证结果

Table 2 Point cloud precision verification results

True value /mm	Measuring value /mm	Measuring error /mm
1	1.0361	-0.0361
3	2.9887	0.0113
5	5.0280	-0.0280
8	8.0249	-0.0249
10	10.0097	-0.0097
15	15.0394	-0.0394

5.2 位姿测量实验

依据上述系统模型, 将结构光投射在被测物上, 得到测量点云, 点云数量为 300, 如图 8 所示。

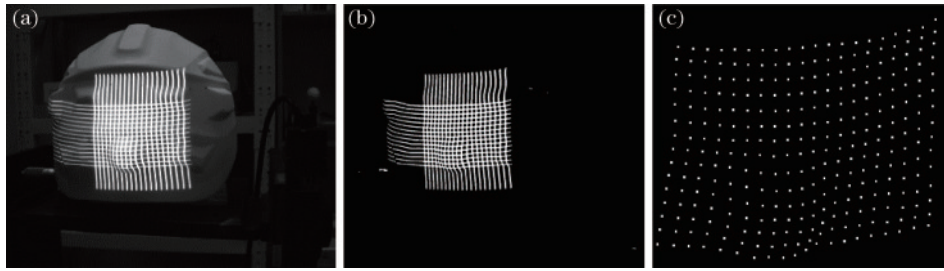


图 8 三维点云测量图像及结果。(a) 原始图像;(b) 预处理后的图像;(c) 生成的三维点云图

Fig. 8 Images and results of 3D point cloud measurement. (a) Original image; (b) processed image; (c) image of 3D point cloud

参考点云通过被测物三维模型直接转换而得。粗配准前,测量点云与参考点云的位置关系如图 9(a) 所示。

首先依据第 3 节所述的 RANSAC 点云粗配准算法,对点云进行粗配准,结果如图 9(b) 所示,从图中可

以看出,粗配准之后,点云部分重合,虽然还存有较为明显的误差,但初步位置基本到位。在此基础上依据分别采用传统 ICP 算法、点到面 ICP 算法和改进的 ICP 算法对点云进行精配准,结果分别如图 10(a)、10(b) 和 10(c) 所示。

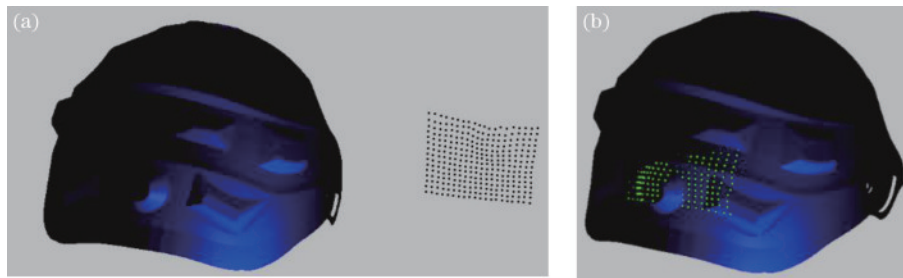


图 9 粗配准前后的测量点云与参考点云。(a) 粗配准前;(b) 粗配准后

Fig. 9 Measurement point cloud and reference point cloud before and after coarse registration. (a) Before coarse registration; (b) after coarse registration

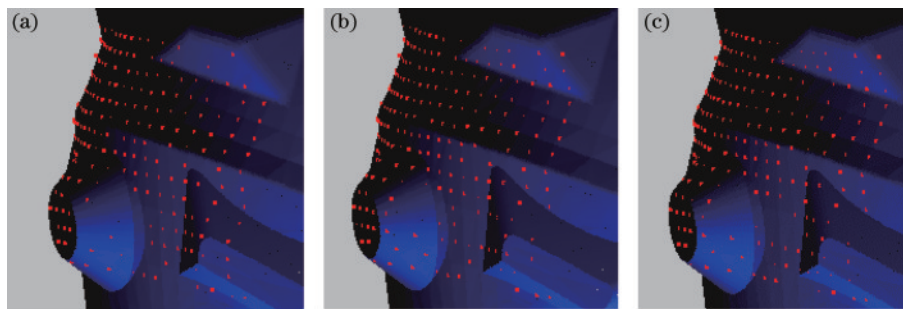


图 10 点云精配准结果。(a) ICP 配准;(b) 点到面 ICP 配准;(c) 改进的 ICP 配准

Fig. 10 Results of point cloud fine registration. (a) ICP registration; (b) point-to-plane ICP registration; (c) improved ICP registration

从图 10 中可以看出,精配准后,测量点云与参考点云几乎完全重合,点云配准精度大幅度提升。为了进一步验证 3 种配准算法的速度和稳健性,将两组点云之间的平均欧氏距离作为配准误差,统计 10 组配准误差和配准时间,结果如图 11 所示。

从图 11(a)中可以看出,点到面 ICP 和改进的 ICP 的配准误差明显小于传统 ICP。从图 11(b)中可以看出,改进的 ICP 配准速度优于传统 ICP 和点到面 ICP。因此,本文采用的改进的 ICP 配准算法,在保证配准精度的同时,提高了配准的速度。

为了更加明确地对比两种配准算法对位姿测量精度的影响,将被测物置于高精度转台上,转台采用的是

卓立汉光 GD22, 负载 10 kg, 精度为 0.01° 。旋转转台并测量三维点云,与参考点云配准得到旋转矩阵。多次旋转转台,比较 3 种点云配准算法的旋转矩阵测量结果,实验结果如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,旋转同样的角度,分别用 ICP 和点到面 ICP 计算旋转矩阵,点到面 ICP 和改进 ICP 的位姿测量精度和稳定性都明显高于传统 ICP。点到面 ICP 和改进 ICP 的位姿测量精度相差较小,但改进 ICP 的配准速度更快,因此本文采用改进的 ICP 实现位姿测量。

采用本文所设计的系统,分别进行旋转矩阵和平移矩阵实验,验证位姿测量精度。测量误差结果如

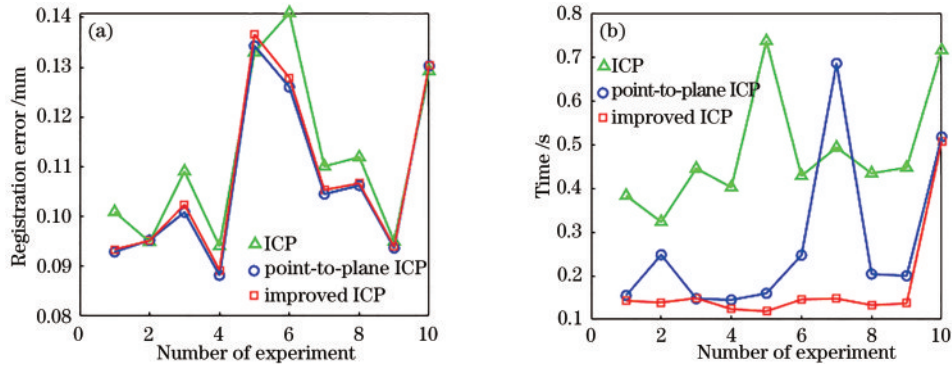


图 11 配准误差和配准时间对比。(a) 配准误差;(b) 配准时间

Fig. 11 Comparison of registration error and time. (a) Registration error; (b) registration time

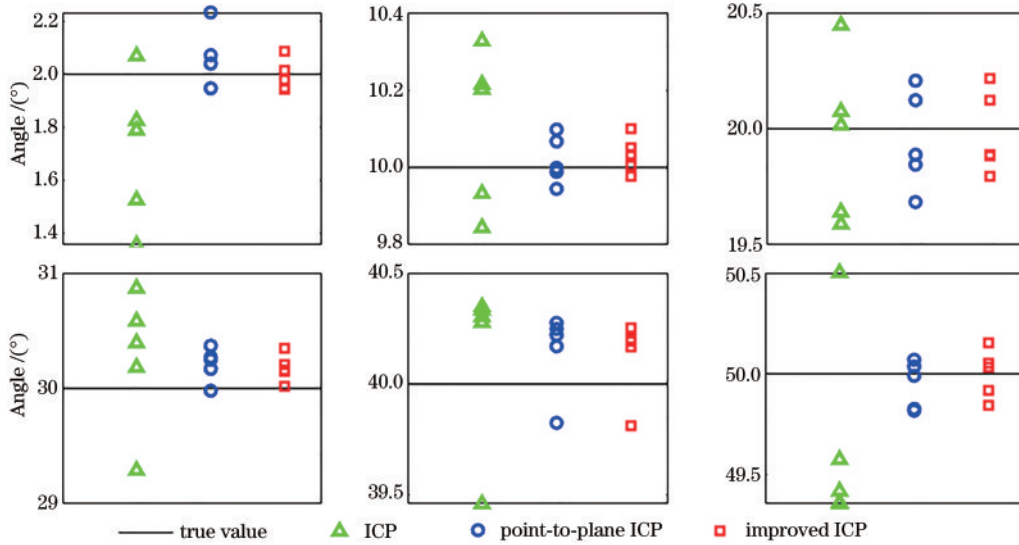


图 12 不同算法旋转矩阵测量结果对比

Fig. 12 Comparison of measurement results of rotation matrix of different algorithms

图 13 所示。

从图 13 中可以看出:测量旋转矩阵时,最大误差不超过 0.25° ;测量平移矩阵时,最大误差不超过

0.35 mm。实验验证了本文所设计的网格结构光位姿测量系统的测量精度,证明了该系统能够应用于实际位姿测量中。

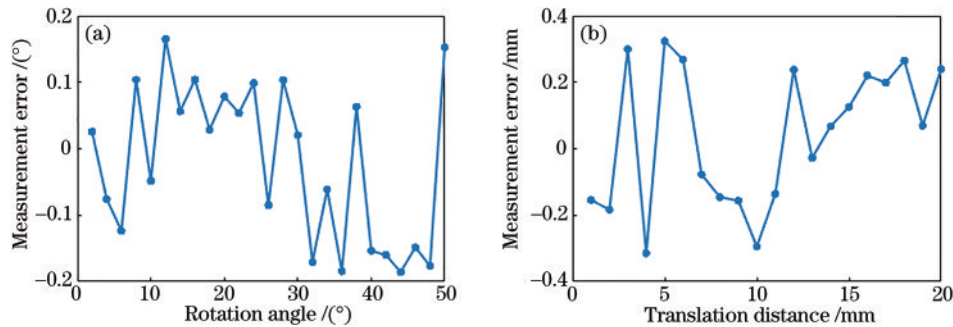


图 13 旋转矩阵和平移矩阵测量误差。(a) 旋转矩阵测量误差;(b) 平移矩阵测量误差

Fig. 13 Measurement errors of rotation matrix and translation matrix. (a) Measurement error of rotation matrix; (b) measurement error of translation matrix

6 结 论

设计了基于网格结构光的位姿测量系统,利用网格结构光采集三维点云特征,并进行位姿解算。建立了基于网格结构光测量的系统模型,并提出了一种网

格结构光的标定方法,可同步完成相机、网格光线的快速标定。实现了被测物表面三维点云的获取,并通过测量平面位移距离的实验验证了三维点云的精度,测量结果最大误差不超过 0.04 mm。系统采用了基于点云配准的位姿测量算法,首先选取 SAC-IA 算法进行

点云粗配准,使两组点云大面积重合。其次,根据点云密度和数量相差较大的特点,采用了改进 ICP 实现点云精配准。实验对比了传统 ICP、点到面 ICP 和改进 ICP 的配准精度、配准速度和位姿测量精度。实验证明,改进 ICP 算法的配准精度优于传统 ICP,且配准速度优于点到面 ICP。最后,通过实验验证了所设计的网格结构光位姿测量系统的测量精度,测量旋转角度的最大误差不超过 0.25° ,测量平移量的最大误差不超过 0.35 mm 。结果证明,该位姿测量系统无需在被测物上安置任何硬件设施,在保证一定测量精度的同时,成功减轻了被测物的重量。

参 考 文 献

- [1] 李洪强. 瞄准具显示参数综合测试系统[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Li H Q. Comprehensive testing system of sight display parameters[D]. Tianjin: Tianjing University, 2019.
- [2] 王乐, 周谦, 方玥, 等. 基于线结构光的钢轨扣件紧固状态检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1612002.
Wang L, Zhou Q, Fang Y, et al. Detection method of rail fastener fastening state based on line structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1612002.
- [3] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
- [4] 周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115001.
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115001.
- [5] Boyer K L, Kak A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, PAMI-9(1): 14-28.
- [6] 杨帆, 刘斌, 初录, 等. 基于网格结构光的双目测量方法[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2304004.
Yang F, Liu B, Chu L, et al. Binocular measurement method using grid structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2304004.
- [7] Will P M, Pennington K S. Grid coding: a preprocessing technique for robot and machine vision[J]. Artificial Intelligence, 1971, 2(3/4): 319-329.
- [8] 孙佳睿. 基于网格结构光的三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Sun J R. 3D reconstruction technology based on grid structure light[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [9] 陈学伟, 朱耀麟, 武桐, 等. 基于 SAC-IA 和改进 ICP 算法的点云配准技术[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(3): 395-401.
Chen X W, Zhu Y L, Wu T, et al. The point cloud registration technology based on SAC-IA and improved ICP[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(3): 395-401.
- [10] 鲁荣荣, 孙海波, 付双飞, 等. 一种基于点云配准的卫星运动参数辨识方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141503.
Lu R R, Sun H B, Fu S F, et al. Point cloud registration based satellite motion parameter identification method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141503.
- [11] 耿磊, 曹春鹏, 肖志涛, 等. 基于激光雷达的多视角点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 1228004.
Geng L, Cao C P, Xiao Z T, et al. Multiview point cloud registration method based on laser radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(12): 1228004.
- [12] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm[C]//Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, May 28-June 1, 2001, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2001: 145-152.
- [13] 陈茂霖, 卢维欣, 万幼川, 等. 无附加信息的地面激光点云自动拼接方法[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0414003.
Chen M L, Lu W X, Wan Y C, et al. Automatic registration of terrestrial point clouds without additional information[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0414003.
- [14] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 3212-3217.
- [15] 赵明富, 曹利波, 宋涛, 等. 三维点云配准中 FPFH 邻域半径自主选取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0610002.
Zhao M F, Cao L B, Song T, et al. Independent method for selecting radius of FPFH neighborhood in 3D point cloud registration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0610002.
- [16] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 666-673.
- [17] Low K L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration[R]. Chapel Hill: University of North Carolina, February 2004.
- [18] 孙农亮, 崔红星, 梁少华. 微细对接焊缝初始点定位方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 765-771.
Sun N L, Cui H X, Liang S H. Method for initial point positioning of micro butt welding seam[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 765-771.