

基于空间点云三维曲面重建的距离测量

林冬云¹, 卢嘉祺¹, 李纯明^{2*}, 彭侠夫¹¹厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361100;²电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 610000

摘要 在机械制造业中, 工件尺寸参数的测量结果关乎材料利用率、设备的工作性能, 具有重要现实意义。对工件测量方法进行研究, 提出了一种基于双目和线结构光的视觉测量方法。首先使用线结构光和双目视觉获得目标表面空间点云, 然后设计了一种基于空间点云的任意两点间曲面距离最短路径搜索算法, 再通过曲面重建、部分投影, 使测地线距离测量结果得到优化。实验结果表明, 所提方法的非接触测量范围在 100~620 mm 内, 与手动测量相比相对误差不超过 0.70%。该方法预期应用于中型工件曲面非接触式距离测量。

关键词 机器视觉; 双目视觉; 线结构光; 空间点云; 三维重建; 工件测量

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415018

Distance Measurement Based on Three-Dimensional Surface Reconstruction of Spatial Point Cloud

Lin Dongyun¹, Lu Jiaqi¹, Li Chunming^{2*}, Peng Xiafu¹¹School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361100, Fujian, China;²School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610000, Sichuan, China

Abstract In the machinery manufacturing industry, the measurement results of the size parameters of a workpiece are related to the material use rate and the working performance of the equipment, which has important practical significance. This study proposes a vision measurement method for workpieces based on binocular vision and line-structured light. First, the line-structured light and binocular vision are used to obtain the spatial point cloud of the target surface, and a shortest path search algorithm for the surface distance between any two points based on the spatial point cloud is designed. Then, the geodesic distance measurement results are optimized through surface reconstruction and partial projection. The results reveal that the range of the noncontact measurement is within 100–620 mm, and experiments show that the relative error does not exceed 0.70% compared with manual measurement. This method is expected to be applied to noncontact distance measurements on the surface of a medium-sized workpiece.

Key words machine vision; binocular vision; line-structured light; spatial point cloud; three-dimensional reconstruction; workpiece measurement

1 引言

工件尺寸测量对于精密加工生产具有重要现实意义, 其结果影响仪器设备的工作性能与使用寿命^[1]。测地线指曲面上任意两点之间的最短路径, 是完成工件几何形状分析的重要曲线^[2]。在工件的加工生产过程中, 测地线测量不仅可以帮助产业部门更加合理规

划材料分配, 降低成本, 节约资源, 还可以用于判断工件的制造精度, 具有重要的实际意义。

目前主要的测量方式包括接触式测量与非接触式测量。接触式测量是指人工使用游标卡尺、量规、三坐标测量机等工具设备进行测量。这些方法测量效率低, 容易造成人为误差^[3-5], 且难以直接应用于特殊生产现场, 比如高温、辐射、有毒的环境等。

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-20; 录用日期: 2022-06-21

基金项目: 福建省厦门市科技局计划项目(3502Z20193001)

通信作者: *chunming.li@uestc.edu.cn

随着科学技术的迅猛发展,具有可靠、高效等特点的非接触式测量方式,如激光^[6]、机器视觉^[7]、超声波^[8]等检测方法受到科研人员的关注。基于双目视觉的测量方法通常采用两个相机对物体进行拍摄,基于视差原理计算出物体的三维信息进而完成测量,是机器视觉测量方法的一种重要形式,广泛应用于众多领域,如田埂边界的识别测距^[9]、工业机器人中的目标检测定位^[10]与尺寸测量^[11]、核环境下的定位测量^[12]、无人驾驶视觉导航避障^[13-14]等。姜学涛^[1]采用汇聚式双目视觉对轴类零件进行三维重建,经几何计算完成轴径、轴长测量,误差稳定在 0.50 mm 以下。雷经发等^[15]利用红外双目相机获取隔膜泵缸盖的三维信息,进而完成直径尺寸的测量,具有较高的准确率。王涛等^[16]搭建散斑双目视觉系统,利用散斑完成立体匹配得到局部点云,再进行点云拼接获取完整航空发动机叶片点云数据,通过 3 次 B 样条曲线拟合获取边界完成模型重构,进而完成叶片弦长、弧线长的测量。然而目前许多应用于工业化视觉测量的产品仍处于实验室研究阶段,推出的产品多以特定、规则的工件如圆形、柱形、平面工件等为主,普遍适用于一般非特定工件的成熟的视觉测量系统较为少见。

为了建立具有一定普适性的非接触测量系统,对于较大的一般工件:首先采用线结构光结合双目相机扫描,通过 Steger 算法^[17]进行光条中心亚像素坐标的提取,再进行立体匹配来获得目标物体表面点云;为了测量任意两点的测地线距离,设计了一种计算目标表面点云上任意两点的最短路径搜索算法;考虑到在不平坦区域的距离测量损失,对不平坦区域进行曲面重建,再重新投影,并计算距离,使测地线距离测量结果得到优化,最终完成点间测地线距离的准确估计。

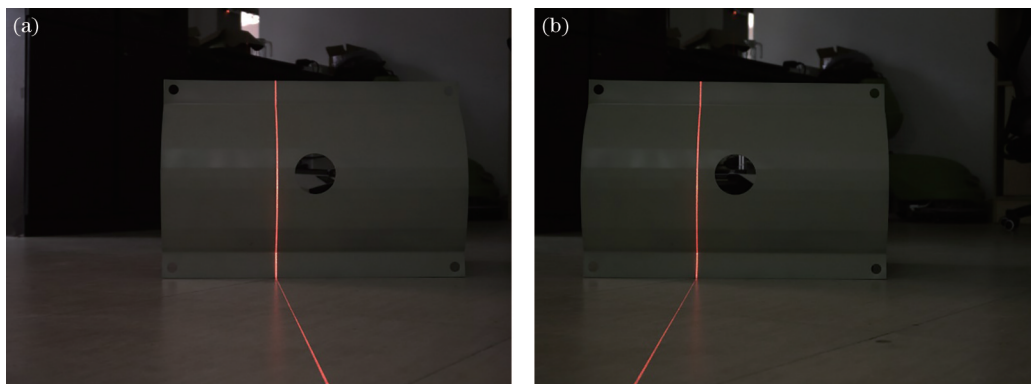


图 2 左右相机采集的图像。(a)左相机采集的图像;(b)右相机采集的图像

Fig. 2 Images captured by left and right cameras. (a) Image captured by left camera; (b) image captured by right camera

2.2 线结构光条纹中心定位

采用张正友标定方法^[18]对测量系统进行标定,获取左右相机的内外参数与相对位姿,使用 Bouguet 算法^[19]完成立体校正,以便于立体匹配时同名点的快速查找。由于背景较为复杂,通过背景差分法^[20]初步提取出激光条纹,如图 3 所示。

2 点云获取

2.1 系统结构

搭建基于线结构光和平行式双目视觉的测量系统,硬件设备如图 1 所示,包括双目相机、舵机、线激光发射器等。考虑到工件弱纹理的特性,采用主动投射射线结构光的方法,以减小立体匹配的难度。通过计算机的控制,使得舵机每次均以最小角度旋转,带动线结构光对工件进行扫描,并利用左、右相机实时跟踪,最终完成图像采集,如图 2 所示。



图 1 基于双目视觉与线结构光的三维重建系统

Fig. 1 Three-dimensional reconstruction system based on binocular vision and line-structured light

激光中心定位的好坏直接影响获得的点云数据的质量。线激光发射器发射的线激光为具有一定宽度的光平面,沿光平面宽度方向光强近似满足高斯分布,反映到图像中,即沿着光条法线,灰度也呈现出近似高斯分布的特点^[21]。Steger 算法^[17]通过构造 Hessian 矩阵求解光条法线,进而在法线方向上进行灰度的泰勒展

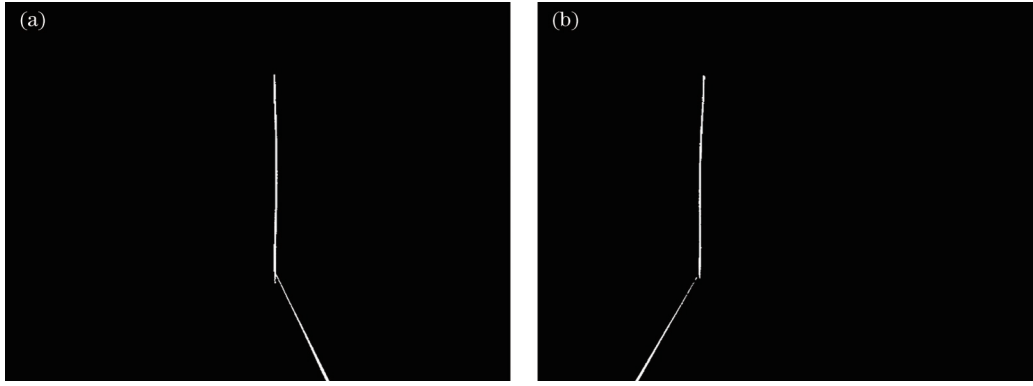


图 3 线结构光条纹提取结果。(a)左相机提取结果;(b)右相机提取结果

Fig. 3 Line-structured light stripe extraction results. (a) Left camera extraction result; (b) right camera extraction result

开,通过极值求解,最终实现激光中心亚像素坐标的提取^[22]。具体实现步骤可参考文献^[22]。

对每幅线激光图像进行上述操作后,通过立体匹配获取同名点坐标 (x_l, y_l) 与 (x_r, y_r) ,即可获得对应点的三维坐标 (X, Y, Z) ,从而完成点云重建:

$$\begin{cases} X = \frac{b \cdot x_l}{x_l - x_r} \\ Y = \frac{b \cdot y_l}{x_l - x_r} \\ Z = \frac{b \cdot f}{x_l - x_r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 和 f 分别表示经标定后获得的基线距离与相机焦距。

点云获取的流程图如图 4 所示。

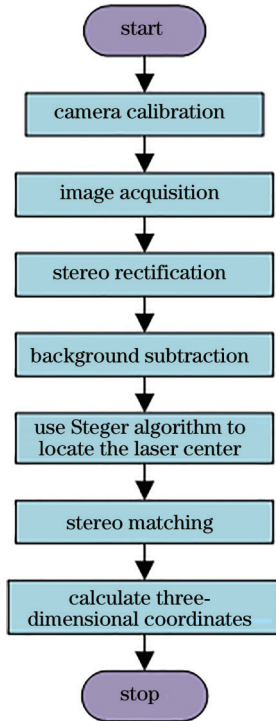


图 4 点云获取流程图

Fig. 4 Flow chart of point cloud acquisition

3 测地线距离测量

3.1 测地线点云路径搜索

为了计算目标表面上任意两点间的测地线距离,需沿着获得的曲面点云搜索两点之间的最短轨迹。由于工件表面点云本质上为离散点集,则考虑从起点 A 处的 r 半径邻域内开始,逐步蔓延到其他点 r 邻域内,最终传递至终点 B ,生成点 A 和点 B 之间的测地线点云路径。

借助 kd-tree 来快速确定各个点的邻域内存在的点的三维信息^[23]。kd-tree 是计算机科学中常用的一种树形数据结构,它充分利用数据在各个维度的方差完成合理的数据划分,主要应用于多维空间关键数据的快速搜索与查找^[23-25]。点 A 与 B 的测地线路径搜索具体步骤如下:

1) 根据工件表面点云构造 kd-tree,设定 r 近邻搜索的参数半径 r ,并创建一个存储点云路径距离和与其对应的点云路径的数据表,初始时空表。

2) 搜索以点 A 为中心、半径为 r 的邻域空间球 $A(r)$ 内满足式(2)的点,构成点集 S 。根据式(3)计算 S 中的每一点与点 A 的欧氏距离,利用式(4)记录其点云路径。

$$S = \{P_i | P_i \in A(r), \overrightarrow{AP_i} \cdot \overrightarrow{AB} > 0\}, \quad (2)$$

$$d(AP_i) = \|\overrightarrow{AP_i}\| = \sqrt{(x_A - x_{P_i})^2 + (y_A - y_{P_i})^2 + (z_A - z_{P_i})^2}, \quad (3)$$

$$\text{path}(AP_i) = \{A, P_i\}. \quad (4)$$

3) 不重复地依次从点云集 S 中抽取出一一点(设取出的当前点为点 P_i),搜索以该点为中心的半径 r 的邻域空间球内满足式(5)的点,构成点集 S_{P_i} 。并计算其中的每个点 Q_i 与点 P_i 的欧氏距离,如果 $d(AQ_i)$ 不存在或 $d(AQ_i) > d(AP_i) + \|\overrightarrow{P_iQ_i}\|$,那么利用式(6)和(7)计算 $d(AQ_i)$ 和 $\text{path}(AQ_i)$ 并更新新数据表。

$$S_{P_i} = \{Q_i | Q_i \in P_i(r), \overrightarrow{AQ_i} \cdot \overrightarrow{AB} > 0\}, \quad (5)$$

$$d(AQ_i) = d(AP_i) + \|\overrightarrow{P_iQ_i}\|, \quad (6)$$

$$\text{path}(AQ_i) = \{\text{path}(AP_i), Q_i\}. \quad (7)$$

同时,将当前点云集 S_p 中的所有点不重复地加入点云集 S_{new} 中。遍历点云集 S 中的所有点,重复步骤 3) 直至点云集 S 中的每一点都提取过后进入步骤 4)。

4) 去除点云集 S_{new} 中那些同时存在于点云 S 中的点,将 S_{new} 中剩下的点云作为新的 S ,同时清空点云 S_{new} 。重复步骤 3)、4) 直到数据列表中第 1 次加入 $d(AB)$ 和 $\text{path}(AB)$ 的那一轮结束。

5) 输出结果,点 A 与点 B 之间的测地线点云路径距离为 $d(AB)$,对应的点云路径为 $\text{path}(AB)$ 。

3.2 曲面重建

通过上述方法得到了 A 、 B 两点间的测地线点云路径,对应的折线距离为 $d(AB)$ 。当两点之间的测地线点云路径经过弯曲部位(如图 5 所示)时,直接以两点间的欧氏距离 $\|\overrightarrow{AP}\| + \|\overrightarrow{PB}\|$ 作为真实弧长 $\widehat{AP} + \widehat{PB}$ 的估计值会造成长度值上的损失,若得到的两点之间的点云路径经过多处类似的弯曲部位,折线距离就会更加偏离真实值。因此,考虑在曲面重建的基础上,对位于弯曲部位的点,以两点之间在重建曲面上的弧长作为其欧氏距离,进而得到更加准确的测地线距离。

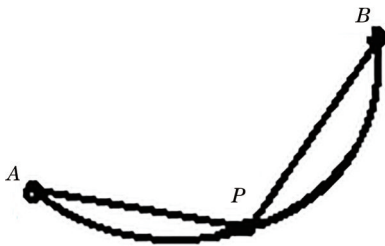


图 5 弯曲区域点云路径与实际曲面的差异

Fig. 5 Difference between point cloud path of curved area and actual surface

由于获取的点云难免存在噪声,采用移动最小二乘法(MLS)对点云进行预处理^[26]。MLS 引入了权函数 $\omega(x - x_i)$,认为 y 的取值仅与 x 的一个局部邻域有关。在拟合区域的一个局部邻域内,拟合函数 $f(x)$ 可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m k_i(x) p_i(x) = \mathbf{p}^T(x) \mathbf{k}(x), \quad (8)$$

式中:待求解的 m 维向量 $\mathbf{k}(x) = [k_1(x), k_2(x), \dots, k_m(x)]^T$,它是坐标 x 的函数; $\mathbf{p}(x) = [p_1(x), p_2(x), \dots, p_m(x)]^T$ 是一个满阶的多项式。拟合函数的具体求解过程可参考文献^[27]。根据 MLS 实现点云平滑事实上就是对空间点云的局部邻域内的点进行高阶多项式拟合,完成点坐标的微调,使点云分布于一个逼近的光滑曲面上^[28]。

完成预处理后,采用贪婪投影三角化算法^[28]进行曲面重建。其基本原理是先将局部邻域内的三维点投影到某一二维平面(常取局部邻域内三维点拟合得到的切平面)上,依据 Delaunay 三角剖分原则完成平面散点集的三角化,再将平面上点间的连接关系映射回三维空间,最终完成曲面重建。该算法的具体实现步骤可参考文献^[29]。

3.3 基于点云路径的测地线计算

对于较为平坦的区域,测地线点云路径与真实的路径十分接近,直接以点云折线距离作为测地线距离的估计值。对于不平坦区域,点间欧氏距离与实际弧长存在较大偏差,易造成测量结果的不精确。

为此,在计算测地线距离时,对得到的点云路径是否经过不平坦区域进行判别:对于处于平坦区域的点云路径,直接计算相邻两点间的欧氏距离作为测量值;对于包含不平坦区域的路径,增加曲面重建步骤,以重建曲面上的对应点之间的弧长作为点间欧氏距离的估计值,将两部分值相加,得到实际值的合理估计。另一方面,虽然边缘路径在很多场景是不平坦路径,但研究发现,边缘路径的距离计算并不适合采用曲面重建后的距离,因此加入边缘路径判别,边缘路径距离直接按点云折线距离计算。测地线算法的流程图如图 6 所示。

在获得两点间点云路径基础上,先进行边缘路径判别,路径上点云密度低于特定阈值的可判断为边缘路径。再判别路径是否经过不平坦区域,进一步将非边缘路径上的点分为平坦区域点和不平坦区域点两类。根据曲面特性,点云路径上相邻的 3 个点间通常存在两种关系:1) 3 个点 (A 、 B 、 C) 均位于较平坦的区域内,此时 \overrightarrow{AB} 和 \overrightarrow{BC} 的夹角较小;2) 3 个点 (B 、 C 、 D) 位于弯曲区域,此时 \overrightarrow{BC} 和 \overrightarrow{CD} 的夹角较大,如图 7 所示。根据此特征,设定一定的角度阈值,可以完成较平坦区域点集与不平坦区域点集的区分。

下面主要阐述对非边缘不平坦区域点集的处理过程。根据得到的曲面模型,即可进行非边缘不平坦区域弧长的近似计算,步骤如下(以两点为例):

1) 假设路径上的相邻两点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 位于弯曲区域,记过 P_1 、 P_2 点且垂直于 xOy 平面的平面为 π_1 ,根据 P_1 、 P_2 的三维坐标, $\overrightarrow{P_1P_2} = (a_1, b_1, c_1)$ 、 π_1 的一个法向量 $\mathbf{n}_1 = (b_1, -a_1, 0)$,则平面 π_1 的点法式平面方程可描述为

$$b_1x - a_1y + a_1y_1 - b_1x_1 = 0. \quad (9)$$

2) 使用 kd-tree 搜索以点 P_1 (或 P_2) 为中心的半径 $2r$ 的邻域空间球 $\mathbf{P}_1(r)$ (或 $\mathbf{P}_2(r)$) 内的所有点,根据重建的曲面模型,筛选出以这些点为顶点的三角面片并存储。

3) 记步骤 2) 中存储的任意一个三角面片的 3 个顶点为 $A(x_a, y_a, z_a)$ 、 $B(x_b, y_b, z_b)$ 和 $C(x_c, y_c, z_c)$,所在

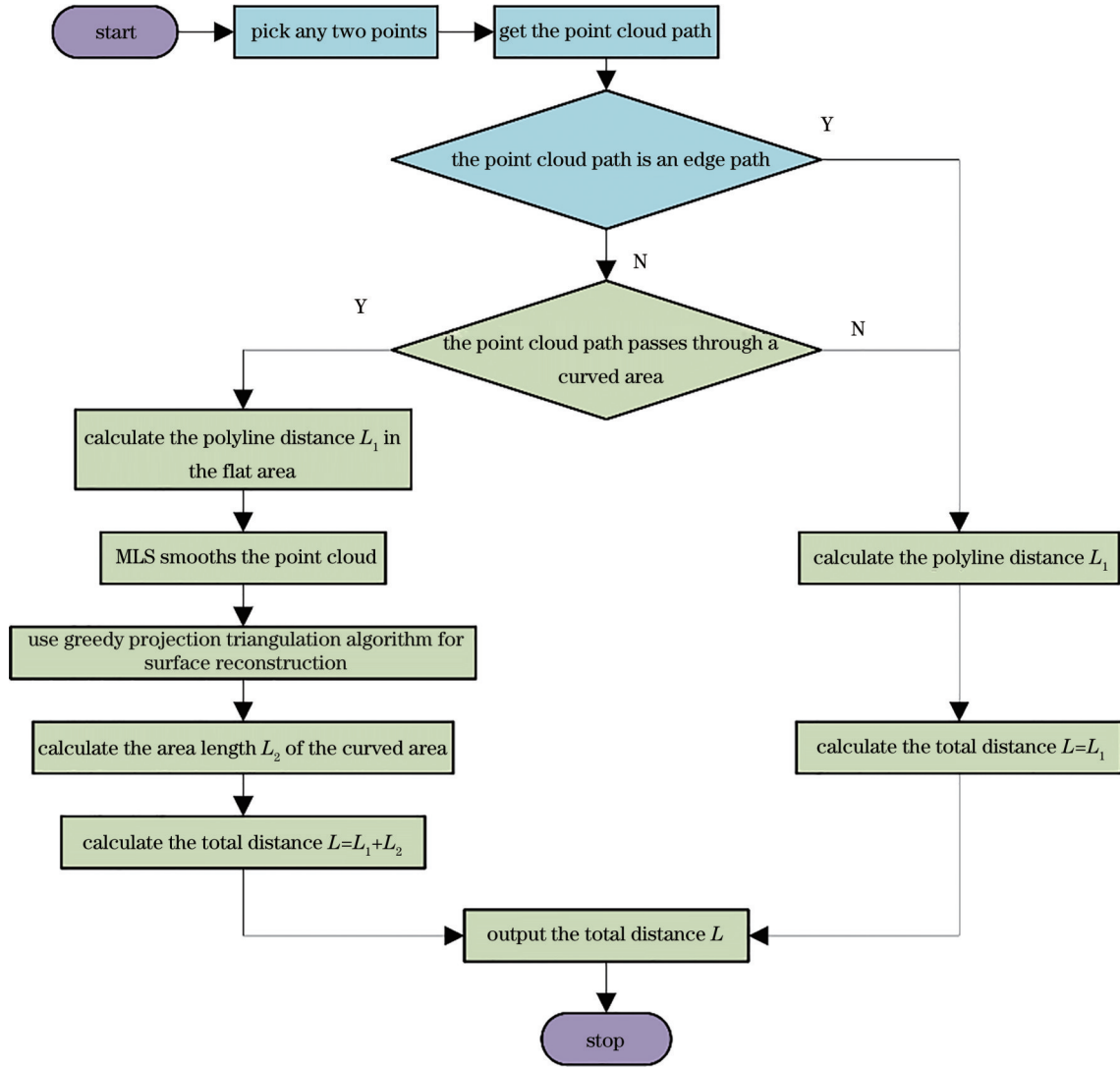


图 6 测地线算法总体流程图

Fig. 6 Overall flow chart of geodesic algorithm

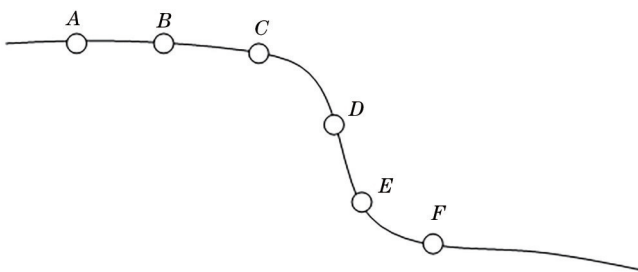


图 7 平坦区域与弯曲区域点云路径搜索结果差异

Fig. 7 Differences in point cloud path search results between flat and curved areas

平面为 π_2 , 计算 $\overrightarrow{AC} = (x_c - x_a, y_c - y_a, z_c - z_a)$, \overrightarrow{BC} 和 \overrightarrow{AB} , 通过计算 $\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{BC}$ 可得到平面 π_2 的一个法向量 \mathbf{n}_2 , 记 $\mathbf{n}_2 = (a_2, b_2, c_2)$, 则平面 π_2 的点法式平面方程为

$$a_2x + b_2y + c_2z - a_2x_a - b_2y_a - c_2z_a = 0. \quad (10)$$

4) 根据平面 π_1 和 π_2 的方程式 (9) 和式 (10), 可得到两平面交线 l_1 的一般式方程, 且 l_1 的方向向量 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2 = (a_1c_2, b_1c_2, -a_1a_2 - b_1b_2)$ 。

5) 根据 \overrightarrow{AB} , \overrightarrow{BC} 和 \overrightarrow{AC} , 计算直线 AC , BC 及 AB 的参数式方程 (以直线 AC 的参数式方程为例):

$$\begin{cases} x = x_a + (x_c - x_a)t \\ y = y_a + (y_c - y_a)t, \\ z = z_a + (z_c - z_a)t \end{cases} \quad (11)$$

式中: t 为参数。

6) 根据直线的方向向量, 判断交线 l_1 与直线 AB 或直线 BC 或直线 AC 是否平行: 若均不平行, 执行步骤 7); 否则, 若交线 l_1 与直线 AB 平行, 则计算交线 l_1 与线段 BC 及线段 AC 的交点, 存储交点坐标, 然后执行步骤 8) (以计算交线 l_1 与线段 AC 的交点为例, 将 AC 的参数式方程代入 l_1 的一般式方程即可得到 t 的表达式):

$$t = - \frac{b_1 \cdot x_a - a_1 \cdot y_a - b_1 \cdot x_1 + a_1 \cdot y_1}{b_1 \cdot (x_c - x_a) - a_1 \cdot (y_c - y_a)}. \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11) 即可得到交线 l_1 与线段 AC 的交点坐标。

7) 计算交线 l_1 与线段 AB 、线段 BC 及线段 AC 的交点, 存储交点坐标。

8) 重复步骤 3)、4)、5)、6)、7) 直到遍历完所有存储的三角面片。

9) 对存储的点的坐标进行排序, 使其按照 P_1 至 P_2 (或 P_2 至 P_1) 的顺序排列。

10) 对完成排序的交点依次计算两点间的欧氏距离, 累加求和, 最终得到 $\widehat{P_1P_2}$ 的弧长。

将平坦区域部分计算得到的距离与不平坦区域部分计算得到的距离相加, 最终得到测地线距离的准确估计。

4 测地线距离测量实验

以 Intel(R)Core(TM)i7-9700 处理器, 16 GB 内存

的 Windows 操作系统为实验平台, 应用 point cloud library (PCL) 库和 OpenCV 库、Matlab 等完成算法实验。

系统工作距离为 1.2~1.6 m。对不同大小和形状的工件进行三维重建和相关尺寸的交互式测量实验。考虑点云的整体密度, 将 r 近邻搜索的半径设置为 8, 设定角度阈值为 15° 。经测试, 在数量为 170000 的点云中, 测地线点云路径的搜索时间约为 641 ms。

所提算法在平坦区域内计算得到的测地线距离、边缘路径距离, 即点云折线距离, 与人工测量值十分接近。进行了不同尺度的重复实验, 测量误差均在 3 mm 内, 相对误差不超过 0.70%, 部分实验结果如表 1 和图 8 所示。图中红点为起点 A 的位置, 黄点为终点 B 的位置, 绿点为测地线点云路径的搜索结果。

表 1 平坦区域测地线点云路径与边缘路径距离测量结果统计表

Table 1 Statistical table of distance measurement results of edge paths and geodesic point cloud paths in flat areas

Number	Manual measurement /mm	Proposed algorithm (polyline distance) /mm	Relative error /%
1	116.0	116.807	0.696
2	241.0	241.858	0.356
3	311.0	312.726	0.555
4	600.0	599.359	0.107
5	118.5	118.732	0.196
6	370.0	372.384	0.644
7	171.0	171.560	0.327
8	124.0	123.795	0.165

以人工接触式测量作为实际值, 当点云路径只位于平坦区域时, 点云路径上任意相邻两点之间的连线与真实曲面上对应两点之间的曲线十分接近甚至重合。当点云路径位于边缘时, 受点云位置及点云获取方式的影响, 不适合将其当作不平坦路径进行处理。此时, 直接采用点云折线距离即可作为测地线距离的准确估计, 表格中的数据也验证了这一点。对于两点之间跨越孔洞区域的情况, 如图 8(g)、(h) 所示, 最短点云路径搜索的弧线会切过孔洞, 因为经过边缘区域, 所以算法将其作为边缘路径进行处理, 完成测地线测量。

若点云路径经过不平坦区域, 则先利用 PCL 库中的 MLS 算法进行点云平滑去噪, 再进行贪婪投影曲面重建 (该步骤需要额外引入约为 8 s 的处理时间), 计算不平坦区域的弧长。将所提算法与基于泊松重建^[30]的弧长计算进行对比, 部分实验结果如表 2 和图 9 所示。

由表 2 可知, 以人工接触式测量作为实际值, 对于点云路径经过不平坦区域的情况而言, 以两点间在重建曲面的弧长替代两点间的欧氏距离几乎均能补偿欧氏距离长度的损失, 得到更准确的测量结果。当点云路径经过多处弯曲区域时, 所提算法的优势能更加明

表 2 测地线点云路径测量结果统计表

Table 2 Statistical table of geodesic point cloud path measurement results

Number	Manual measurement /mm	Polyline distance /mm	Relative error /%	Poisson reconstruction /mm	Relative error /%	Proposed algorithm /mm	Relative error /%
1	127.0	126.311	0.543	127.211	0.166	127.415	0.327
2	246.0	244.860	0.463	245.225	0.315	245.989	0.004
3	360.0	358.847	0.320	359.058	0.262	359.591	0.114
4	389.0	388.904	0.025	388.998	0.001	389.212	0.054
5	463.0	460.017	0.644	461.832	0.252	462.504	0.107
6	547.0	544.190	0.514	545.653	0.246	546.483	0.095
7	610.5	607.080	0.560	607.399	0.508	607.685	0.461
8	618.0	617.862	0.022	617.913	0.014	617.891	0.018

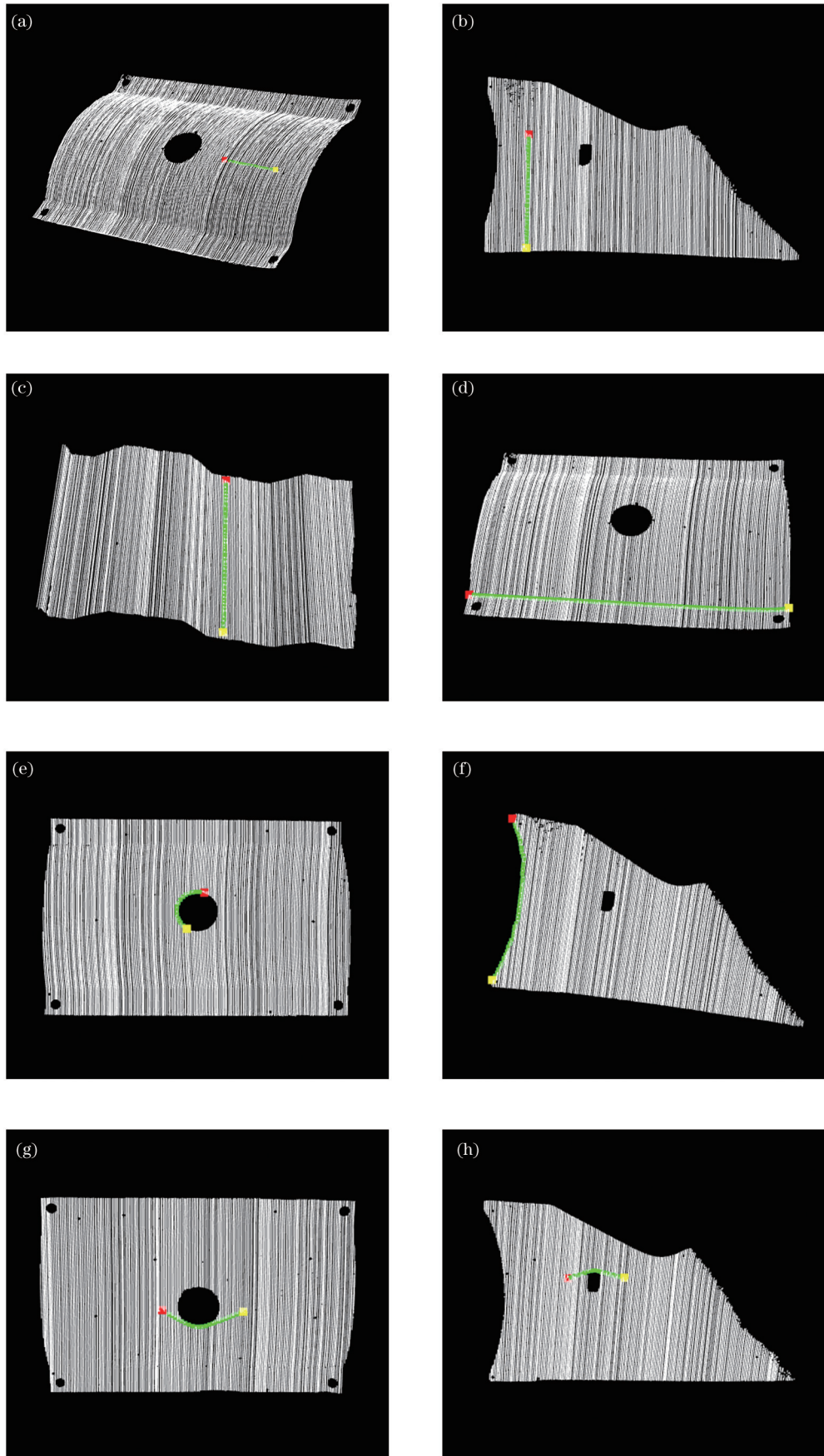


图 8 测地线点云路径搜索结果。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3;(d)实验 4;(e)实验 5;(f)实验 6;(g)实验 7;(h)实验 8

Fig. 8 Geodesic point cloud path search results. (a) Experiment 1; (b) experiment 2; (c) experiment 3; (d) experiment 4; (e) experiment 5; (f) experiment 6; (g) experiment 7; (h) experiment 8

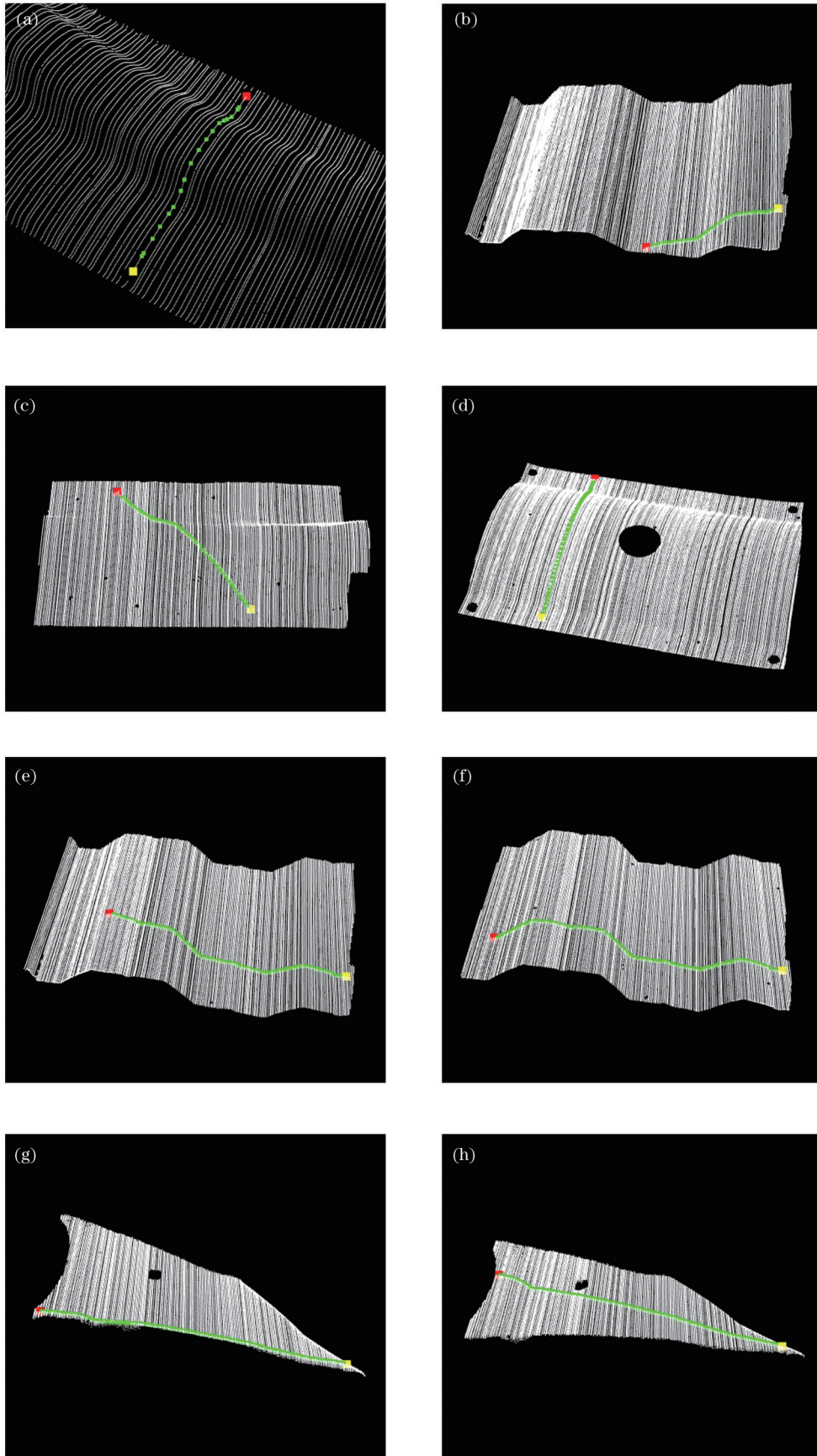


图9 测地线点云路径搜索结果。(a)实验1;(b)实验2;(c)实验3;(d)实验4;(e)实验5;(f)实验6;(g)实验7;(h)实验8

Fig. 9 Geodesic point cloud path search results. (a) Experiment 1; (b) experiment 2; (c) experiment 3; (d) experiment 4; (e) experiment 5; (f) experiment 6; (g) experiment 7; (h) experiment 8

显表现出来(如实验 5、实验 6)。但因重建曲面与真实曲面存在一定的差异,个别重建曲面后的测量结果不如点云折线距离(如实验 4,二者差异 0.308 mm),但仍十分接近实际值。需要指出的是,重建后的测量值均大于点云折线距离,这是因为两点之间距离最短,弧线代替直线必然更长,但也更接近手工测量值。总体而言,对于经过不平坦区域的短程线,通过所提算法测量得到的短程线距离结果比点云路径折线距离计算结果要更接近手工测量值,测量误差均小于 3 mm,相对误差稳定在 0.50% 内,所提算法具有实际优势。

在与基于泊松重建后再路径投影的比较中发现,对于经过弯曲程度较大、个数较多的点云路径,所提算法对弯曲部位弧长的补偿更加明显,可使测量结果更

加接近人工测量值。实验 5 对应的曲面重建情况如图 10 所示,对于数量为 149569 的点云,贪婪投影三角化能在保持点云数量不变的基础上,重建获得 290697 个三角面片。然而,泊松重建仅保存了 41437 个顶点及 82736 个面片,虽然具有消除孔洞、获得更加细腻的三角网格等优势,但是造成了较多的数据流失。虽然贪婪三角化可能导致出现孔洞,但只是分段局部投影,求取与三角形边的交点并计算距离,从本质上而言,仍然是计算折线距离。孔洞的存在虽然会产生一定的影响,但通过投影计算总体上还是能较好地实现弧长的近似计算。虽然存在个别基于泊松重建的测地线距离测量更优的情况,但考虑到对弯曲部位距离的补偿效果,所提算法更为有效。

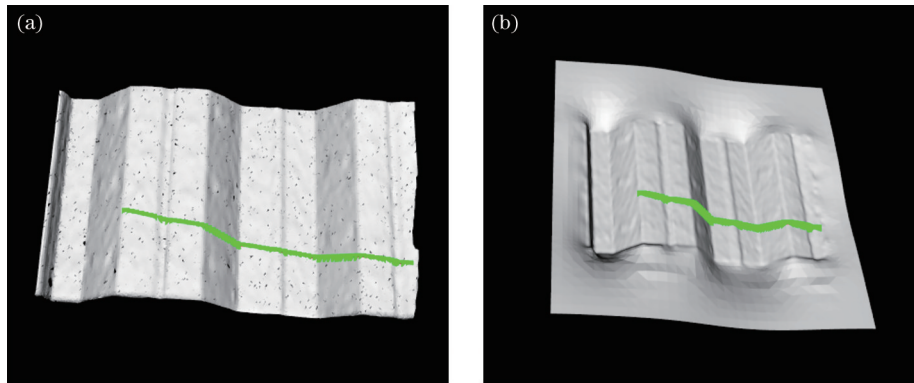


图 10 曲面重建结果。(a)贪婪投影三角化结果;(b)泊松重建结果

Fig. 10 Surface reconstruction results. (a) Greedy projection triangulation result; (b) poisson reconstruction result

事实上,增加点云密度的方式也能提高测地线距离测量的精度。然而,所提测量系统只能通过调整激光的角度进行多次扫描达到增加点云密度的目的。正常情况下,该系统每次完成图像采集需 27 s,重建点云需 145 s。若进行两次或三次扫描,时间成本将是原来的 2 或 3 倍。相比较而言,所提算法在时效性上更有优势。

实验结果表明,该测量系统可以对尺寸在 100~620 mm 的工件进行三维点云重建和测量,对于采用的部分工件而言,测量结果的相对误差稳定在 0.70% 之内,具有较好的测量精度,可以代替人工测量结果。

5 结 论

通过计算机控制舵机旋转,使舵机带动线结构光对工件表面自动均匀扫描,同时用双目相机进行拍照;对采集的图像进行处理,提取结构光光条条纹亚像素中心,再通过立体匹配得到对应的视差图,从而得到目标表面的三维空间点云;在此基础上,提出了基于空间点云的任意两点间最短路径搜索算法,进一步考虑到不平坦区域的距离损失,采用重建曲面再投影来优化测地线距离测量结果。实验结果表明,所提非接触测量范围在 100~620 mm,与手动测量相对误差不大于 0.70%。所提测量方法可应用于一般工件测量,也可

应用于特殊生产现场,比如高温、辐射、有毒的环境等,具有测量速度快、精度高、适用范围广的特点。

参 考 文 献

- [1] 姜学涛. 基于汇聚式双目视觉的轴类零件测量技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 1-8.
Jiang X T. Research of measurement technology for shaft parts based on convergent binocular vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 1-8.
- [2] 赵俊莉, 辛士庆, 刘永进, 等. 网格模型上的离散测地线[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(3): 313-335.
Zhao J L, Xin S Q, Liu Y J, et al. A survey on the computing of geodesic distances on meshes[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(3): 313-335.
- [3] 姚美如. 航空发动机叶片面型三维视觉测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1-6.
Yao M R. Research on 3D vision measurement technology of aeroengine blade surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1-6.
- [4] 殷炜祺. 轴类零件尺寸的视觉测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-8.
Yin W Q. Research on vision measuring technology of shaft diameters[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 1-8.
- [5] 刘洋. 大尺寸低纹理零构件的三维测量关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 1-13.
Liu Y. Research on key techniques of 3D measurement of

- large scale and low texture surface[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1-13.
- [6] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.
- [7] 吴志鹏, 黄丹平, 郭康, 等. 基于机器视觉的新型光缆节距检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081505.
Wu Z P, Huang D P, Guo K, et al. Optical cable pitch detection method based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081505.
- [8] 周世杰, 李顶根. 基于超声测量及神经网络的锂离子动力电池 SOC 估算[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(1): 19-24.
Zhou S J, Li D G. SOC estimation for lithium ion power batteries based on ultrasonic measurement and neural networks[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(1): 19-24.
- [9] 洪梓嘉, 李彦明, 林洪振, 等. 基于双目视觉的种植前期农田边界距离检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 27-33, 56.
Hong Z J, Li Y M, Lin H Z, et al. Field boundary distance detection method in early stage of planting based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 27-33, 56.
- [10] Wan G Y, Li F D, Zhu W J, et al. High-precision six-degree-of-freedom pose measurement and grasping system for large-size object based on binocular vision[J]. Sensor Review, 2020, 40(1): 71-80.
- [11] 卢岸潇. 基于双目立体视觉的工件定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 61-74.
Lu A X. Research on the technology of workpiece positioning based on binocular vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 61-74.
- [12] 黄文有, 徐向民, 吴凤岐, 等. 核环境水下双目视觉立体定位技术研究[J]. 光电工程, 2016, 43(12): 28-33.
Huang W Y, Xu X M, Wu F Q, et al. Research of underwater binocular vision stereo positioning technology in nuclear condition[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(12): 28-33.
- [13] 谭静, 赵健康, 崔超. 基于双目视觉与IMU的组合导航算法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(2): 442-448.
Tan J, Zhao J K, Cui C. Integrated navigation algorithm based on stereo vision and IMU[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(2): 442-448.
- [14] 岳亮. 一种基于双目视觉的安全车距测量方法[J]. 电视技术, 2013, 37(15): 194-197, 210.
Yue L. Method of vehicle safety distance measurement based on binocular vision[J]. Video Engineering, 2013, 37(15): 194-197, 210.
- [15] 雷经发, 韦旺, 李永玲, 等. 基于双目视觉的弱纹理液压元件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181511.
Lei J F, Wei W, Li Y L, et al. Dimensionality measurement of weak texture hydraulic components based on binocular vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181511.
- [16] 王涛, 李战, 王盛, 等. 基于散斑视觉测量的叶片模型重构[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011501.
Wang T, Li Z, Wang S, et al. Blades model reconstruction based on speckle vision measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 011501.
- [17] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [18] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] 李杰. 基于双目视觉的深度重建技术的研究和应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 12-22.
Li J. The research and application of depth reconstruction based on binocular vision[D]. Changchun: Jilin University, 2016: 12-22.
- [20] 乐英, 赵志成. 基于背景差分法的多运动目标检测与分割[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(4): 305-309.
Le Y, Zhao Z C. Multi-moving object detection and segmentation based on background difference method[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(4): 305-309.
- [21] 秦子扬, 夏桂锁, 伏燕军, 等. 基于差影法的Hessian矩阵激光条纹中心提取方法研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 28-33.
Qin Z Y, Xia G S, Fu Y J, et al. Extraction of hessian matrix laser stripe center based on difference image method[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2017, 31(3): 28-33.
- [22] 贾卫平, 王邦国. 基于Hessian矩阵的多结构光条纹中心快速提取方法[J]. 大连大学学报, 2014, 35(6): 34-37.
Jia W P, Wang B G. The method for fast detecting the center of multi-structured light stripes based on Hessian matrix[J]. Journal of Dalian University, 2014, 35(6): 34-37.
- [23] 廖丽琼, 白俊松, 罗德安. 基于八叉树及KD树的混合型点云数据存储结构[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(3): 87-90.
Liao L Q, Bai J S, Luo D A. Integrated point cloud storage structure based on octree and KDTree[J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(3): 87-90.
- [24] 彭杰. 三维点云场景的配准与重建技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020: 35-37.
Peng J. Research on registration and reconstruction of 3D point cloud scene[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020: 35-37.
- [25] 林耀冬. 基于Kinect的再制造零件三维表面建模系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 52-56.
Lin Y D. 3D surface modeling of remanufactured parts based on Kinect[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 52-56.
- [26] 雷玉珍. 三维点云数据处理中的若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 24-29.
Lei Y Z. Research on some key technologies of 3D point

- cloud data processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 24-29.
- [27] 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 Q H, Lu D T. Curve and surface fitting based on moving least-squares methods[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(1): 84-89.
- [28] 吴晓庆, 黄玉清. 基于移动最小二乘法的点云平滑及重采样[J]. 微型机与应用, 2017, 36(11): 47-49, 53.
- Wu X Q, Huang Y Q. Smoothing and resampling of point cloud based on moving least squares[J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 36(11): 47-49, 53.
- [29] 李晓捷. 基于深度相机的三维人体重建及在服装展示方面的技术研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016: 53-57.
- Li X J. Research on 3D human body reconstruction based on depth camera and its technology in clothing display [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016: 53-57.
- [30] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction[C]//SGP '06: Proceedings of The Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, June 26-28, 2006, Cagliari, Sardinia, Italy. New York: ACM Press, 2006: 61-70.