

基于双目结构光的工件三维重建系统研究

吴际春, 陈锡松, 浦天秋, 刘 艳

(河海大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213200)

摘要: 现代工业三维测量中, 简洁的系统硬件结构、易于实现与高精度的重建方法是主要的研究方向; 针对激光扫描重建方法的复杂性, 以及单目结构光在复杂或陡峭表面重建精度受限等问题, 开展双目结构光的工件三维重建系统研究; 基于自主构建的三维重建平台, 投射经编码的结构光图案, 通过掩膜去除目标物体背景; 结合互补格雷码和四步相移法解算图像的绝对相位; 填充视差图中的视差空洞, 实现弱纹理区域的高精度相位匹配; 采用高精度匹配方法计算所有像素点的视差, 以实现待测工件的三维重建; 项目的创新点是利用结构光来提高双目图像匹配的效率和精度; 实验结果表明, 弱纹理与重复纹理目标区域的匹配精度较传统双目立体匹配算法更高, 且能有效降低环境噪声和光照变化的影响, 获得高精度的工件三维重建结果。

关键词: 结构光; 双目视觉; 立体匹配; 三维重建; 图像处理

Research on 3D Reconstruction System for Workpieces Based on Binocular Structured Light

WU Jichun, CHEN Xisong, PU Tianqiu, LIU Yan

(School of Information Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: In modern industrial three-dimensional measurement, it is a main research direction for simple system hardware structure, easy implementation and high-precision reconstruction method. In view of the complexity of laser scanning reconstruction methods and the limited reconstruction accuracy of monocular structured light on complex or steep surfaces, research on a three-dimensional reconstruction system for workpieces with binocular structured light is carried out. Based on the self-constructed three-dimensional reconstruction platform, the encoded structured light pattern is projected, and the background of the target object is removed through the mask; The absolute phase of the image is solved by combining complementary Gray code and four-step phase shifting method; The parallax holes in the disparity map are filled to achieve high-precision phase matching in the weak texture areas; The high-precision matching method is used to calculate the parallax of all pixels, and achieve the three-dimensional reconstruction of the workpieces to be tested. The innovation of the project is to improve the efficiency and accuracy of binocular image matching by using the structured light. Experimental results show that the high-precision matching method has the advantages over the traditional binocular stereo matching algorithm in the matching accuracy of weak texture and repeated texture target areas and can effectively reduce the influence of environmental noise and illumination changes, and obtain high-precision three-dimensional reconstruction results for the workpieces.

Keywords: structured light; binocular vision; stereo matching; three-dimensional reconstruction; image processing

0 引言

随着机器视觉技术的发展, 基于双目图像进行的三维重建技术已成为重点研究内容, 该技术在工业自动化、自动驾驶、人工智能等场景下都有着广泛的应用

前景。

在工业测量的过程中, 三维重建技术展现出了巨大的潜力和价值。为保证对目标工件精确无误的测量, 一般使用的是基于接触式的三维重建方式。但接触式测量技术需要价格高昂的测量工具, 且测量速度缓慢, 存在

收稿日期:2024-06-21; 修回日期:2024-08-03。

基金项目:国家重点研发计划资助(2023YFB3907203);河海大学大型仪器设备共享基金资助(GX202311B)。

作者简介:吴际春(2004-),女,大学本科。

通讯作者:刘 艳(1984-),女,博士,副教授,硕士生导师。

引用格式:吴际春,陈锡松,浦天秋,等. 基于双目结构光的工件三维重建系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8):225-233.

划伤物体表面或造成形变的风险。由于接触式测量方式的局限性,非接触式测量方法具有更广泛的应用前景。非接触式测量中的光学测量技术因其高安全性和快速测量的特点,在工业制造领域得到了广泛应用。

目前已有很多科研学者对三维重建进行了研究。付鲁华^[1]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。张博霄^[2]针对现有线结构光对复杂物体进行三维重建时存在信息缺失的问题,分析遮挡导致信息残缺的机理,定量分析线结构光系统参数和遮挡残缺之间的关系,提出一种长短基线结构光交叉补缺重建方法,大大提高了三维重建的精度。同样是在工业检测领域,刘建春^[3]针对具有复杂纹理的金属工件位姿检测问题,利用双目视觉和DLP投影仪,以工件局部特征作为检测重点,提出一种投射差分多线结构光的方法,使差分结构光中心线相互补偿,降低新中心线上出现异常点的概率。基于格雷码的方法具有鲁棒性强和抗噪性良好的优点,易于实现,在工业检测、生物医学等领域被广泛应用。但传统的基于格雷码图案的相位展开方法往往容易出现跳变误差,为了避免这一情况,提高相位展开的精度,郑文迪^[4]设计了一种六步相移结合互补格雷码的方法。

采用双目的结构光图像进行三维重建的过程中,立体匹配是最关键的步骤。立体匹配是通过匹配双目图像中对应的像素点,然后计算出各匹配点的视差进而获取深度信息。立体匹配算法可以分为基于相位、基于像素特征等不同类别^[5]。针对在弱纹理与重复纹理目标的情境下,双目相机在立体匹配时效率较低的问题,采用基于相位的立体匹配算法,可以有效利用相位信息,避免基于像素的匹配方法易出现的匹配孔洞等问题,满足工件测量及三维重建的高精度要求。

环境噪声和光照变化会影响工件三维重建精度。针对复杂光照条件或目标纹理稀疏场景,结合双目视觉原理和基于相位的光栅重建算法,融合SIFT算子和GC全局算法的相位匹配算法,构建基于双目结构光进行工件精密测量的系统。通过投射编码结构光的图案,来提高基于相位信息的立体匹配效率,并填充视差空洞,实现三维重建。

1 双目结构光三维重建实验平台

双目视觉测量系统通过视差、焦距和距离信息,实现对测量点深度信息的精确获取。其中,双目图像中像素点的匹配,求解视差,是系统进行三维重建的核心步骤。如图1所示,构建的双目视觉实验平台由左右两侧配置的高清可见光相机以及一部投射结构光的投影仪共同构成。该系统涵盖了相机标定校正模块、图像匹配

模块、三维点云生成模块。

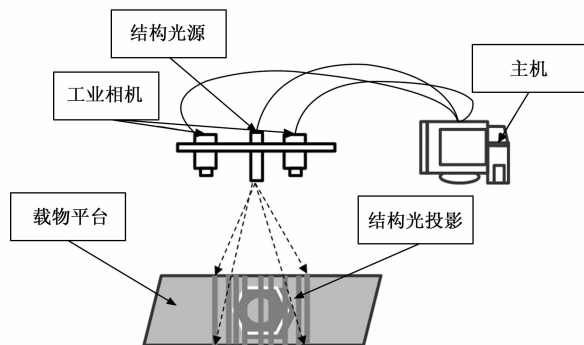


图1 双目视觉实验平台结构图

系统三维重建的实验测量流程包括图像采集、双目相机的标定、极线校正、绝对相位的获取、相位匹配以及三维重建。双目结构光视觉测量通过投影仪投射一系列编码图案投影至工件表面,左右两个可见光相机拍摄经过投射结构光的工件,采集工件的左右图像。为了提高后续匹配的速率和精度,通过极线校正,实现左右视图的行对准。然后采用互补格雷码与相移法相结合的格雷码解码算法解得左右视图的绝对相位信息。根据解码获得的绝对相位信息进行相位匹配,得到左右相机像素点的映射关系,计算左右两幅图像间的视差,生成视差图。基于视差图,利用物体与相机之间的距离与视差成反比的原理,运用三角测量法构建三维点云,通过点云数据将目标工件以三维立体的形式呈现。

1.1 图像采集

为了精准捕获工件表面的形貌特征,采用时域编码的结构光投影。为弥补自然二进制码在解码过程中易解码错误的缺陷,运用投射互补格雷码与相移法相结合的编码图案策略,减少编码图案的数量的同时提升测量精度^[6]。

格雷码图像的生成采用递归思想,先列出 $n-1$ 位的格雷码,将这组格雷码进行逆序排列,再将原始序列与其逆序序列进行合并。合并后的格雷码序列中,前半部分需在每个格雷码前添加“0”,而后半部分则在每个格雷码前添加“1”。

自此 n 位格雷码已经生成,从所得编码中提取同一位上的值,并按照从高到低的顺序进行排列。在此过程中,编码“0”对应于灰度值0,而编码“1”则对应于灰度值255^[7]。遵循这一规则,可进一步生成 n 张格雷码图。图2展示了通过该方法得到的5幅格雷码。

在生成4步相移编码图案的过程中,根据四位格雷码,将编码区域划分为与之对应的16部分,相移码的周期数 $f=16$,周期 $T=Width/f$,因此:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi fx}{Width} \quad (1)$$

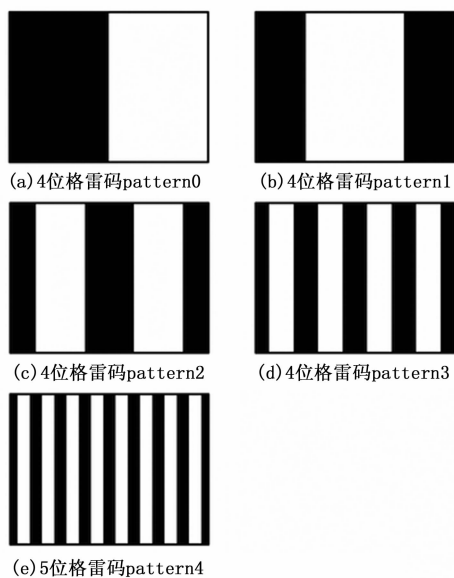


图 2 五幅格雷码编码图

其中: $Width$ 表示图像宽度。本系统采用图像宽度为 1 280 像素的投影仪, 因此生成的周期宽度为 $T = 1\ 280/16$ 像素。

通过生成一个 1 280 维的行向量, 根据公式:

$$I(x, y) = 128 + 127 \cos \left[2\pi \left(\frac{fx}{Width} + \frac{n-1}{N} \right) \right] \quad (2)$$

对每一个向量元素进行填充, 循环生成 800 行, 最后获得四步相移图像, 如图 3 所示。

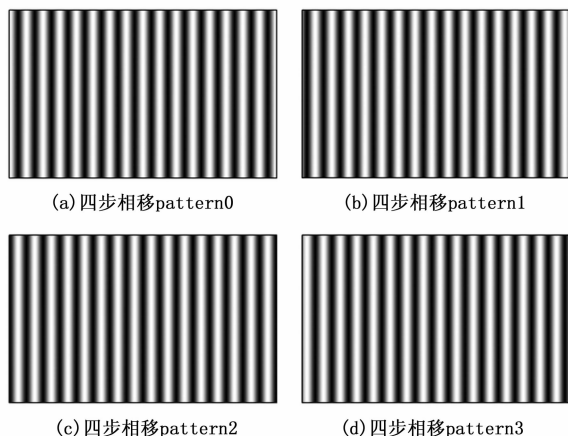


图 3 四步相移编码图

系统将需要的编码图案传输到投影模块中, 在图像采集过程中, 系统发送编码图案到投影模块, 投影模块投射编码图案到目标物体上, 与此同时左、右相机接收信号后对编码图案进行拍摄采集, 并将采集到的编码图像信息发送到系统上, 计算机保存接收到的图像。

1.2 双目相机的标定

在双目视觉系统中, 相机标定是必不可少的基础步骤。其主要目的是获取相机的精确参数, 从而能够将目标点从二维相机平面转换到三维空间^[8]。由于标定结果

的精准度关系到后续匹配和三维重建结果的准确性, 因此, 标定双目相机是必不可少的前置步骤。双目成像模型坐标系包含 4 个坐标系, 坐标系之间的变换关系如图 4 所示。

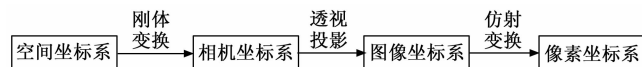


图 4 双目成像模型坐标系的变换关系

双目相机的标定过程包括校准相机的内外参数, 如畸变系数和旋转平移矩阵等。其中, 旋转矩阵用于描述左相机和右相机坐标系之间的旋转姿态, 而平移矩阵则表示从一个相机坐标系原点到另一个相机坐标系原点的平移过程。旋转矩阵与平移矩阵充分说明了左相机和右相机之间的相对位姿^[9]。

坐标系之间的转换关系为:

$$z_c \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: x_c, y_c, z_c 为相机坐标系中的坐标, x_w, y_w, z_w 为世界坐标系中点的坐标, 而 f_x, f_y, u_0, v_0 相机的内部参数有关^[10]; M_2 是相机外参, 表示相机在世界坐标系的姿态和位置矩阵。内参实现相机坐标系到图像坐标系的转换, 外参实现世界坐标系到相机坐标系的转换。

本系统采用张正友标定法, 在标定过程中, 使用高精度小标定板优化标定精度, 不断改变标定板的位置, 通过采集多组标定板的图像, 完成对左右相机的内参矩阵、畸变系数、旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 的参数计算, 实现双目相机的高精度标定。

1.3 极线校正

为改善传统图像匹配搜索匹配效率低和误匹配率高等问题, 本文通过使用 Bouguet 校正方法进行双目极线校正^[11], 实现图像上的二维搜索到一维搜索的转变。

对于左右相机的旋转矩阵 R , 将其分解为各自独立旋转一半的旋转矩阵 R_1, R_2 :

$$\begin{cases} R_1 * R_2^{-1} = R \\ R_1 = R_2^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

利用分解后的旋转矩阵, 使左右相机分别旋转一半, 从而使两相机的光轴实现平行对齐。构造变换矩阵 R_{rect} , 将 R_1 和 R_2 分别与变换矩阵 R_{rect} 相乘, 得到整体旋转矩阵^[12]。通过将左右相机的坐标系分别乘以它们

各自的整体旋转矩阵, 能够使基线与成像平面进行对齐, 实现行对准^[12]。

校正完成后, 重新选择图像中心, 使得左右图像的重叠部分最大。通过极限校正后, 左、右图像中的匹配点在同一条极线上, 提高了后续相位匹配的效率与精度。

1.4 绝对相位的获取

为增强待测工件的表面纹理特征, 提高弱纹理区域的三维重建效率, 本文在传统的双目视觉三维重建的基础上添加主动投影模块。

1.4.1 编码图像预处理

为了提高测量效率, 编码图像的预处理包括剔除非物体区域的像素点和对编码图案进行二值化处理^[13]。

为了将非物体区域像素点剔除, 提取出有效的测量区域。系统在投射编码图案之前, 投射一幅全黑的图案和一幅全白的图案。以 I_{lb} 和 I_{rb} 分别作为投射全黑图案时左右相机采集的图像, I_{lw} 和 I_{rw} 分别作为投射全白图案时左右相机采集的图像。对投射全黑和全白图案时同一像素点的灰度值进行比较, 作运算:

$$I_{ml} = I_{lw} - I_{lb} \quad (5)$$

$$I_{mr} = I_{rw} - I_{rb} \quad (6)$$

当投射全黑图案和全白图案时, 对于未能覆盖的区域, 其灰度值变化相对较小, 通过设定阈值, 利用图像灰度差可以将非物体区域像素点剔除, 从而提取目标工件的区域, 获得掩码图像, 通过减少格雷码与相移码的解码区域即背景区域^[14], 可以减少运算量, 提高算法的效率。

在编码图案的二值化处理中, 本系统采用一种自适应阈值二值化方法, 只处理目标物体区域, 计算像素点在四幅相移图案的平均灰度值作为阈值。随后, 对于编码格雷码图案像素点的灰度值低于阈值, 则转换为灰度值为 0, 反之则转换为灰度值为 1。

1.4.2 格雷码结合四步相移法求包裹相位

本系统通过正弦相移法进行投影, 提高采样密度, 投影图案在同一个周期内, 相位是连续递增的。通过投影四幅不同相位差的正弦相移图案, 然后对拍摄后的图像进行解码即可得到物体对应的包裹相位信息^[15]。正弦相移的光强函数公式如下:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta\varphi_n] \quad (7)$$

其中: $\Delta\varphi_n = 2\pi(n-1)/N [n \in (1, N)]$, $A(x, y)$ 为光强, $B(x, y)$ 为调制幅值, $\varphi(x, y)$ 为包裹相位, $\Delta\varphi_n$ 为平移相位。本算法采用四步相移法, 需要投影四张相移图案, 每次移动的相位与之前的差为 $\pi/2$, 可以得到不同投影图案中的光强公式:

$$I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)]$$

$$I_1(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \sin[\varphi(x, y)]$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \cos[\varphi(x, y)]$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin[\varphi(x, y)] \quad (8)$$

其中: $I_i(x, y)$ 为第 i 幅图案的光强公式, 联合上式可以得出:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \quad (9)$$

其中: $\varphi(x, y)$ 为包裹相位。

1.4.3 相位求解绝对相位

为了将包裹相位还原成连续的绝对相位, 需要结合格雷码条纹的阶次信息进行相位展开, 在每一个包裹相位截断处加上 $2k\pi$, k 表示格雷码条纹阶次, 可以将包裹相位恢复成连续的相位。

在实际过程中, 由于投影仪和相机的畸变效应, 所投的格雷码会发生超前或者滞后导致解包裹相位产生错位。为了对相位错位产生的误差进行校正, 因此采用互补格雷码在相位截断处做出相应的补偿, 从而恢复出平滑的绝对相位^[16]。

为了避免边界解码错误, 在传统的四位格雷码基础上增加了一张阶次相位上错开半个周期的五位格雷码图案, 设前四张格雷码条纹的阶次与第五张互补格雷码条纹分别为记作 k_1, k_2 , 则 k_1 与 k_2 相互错开了半个周期^[17]。为了获取准确的绝对相位值并避免截断处的相位翻转, 采用了如下的公式进行计算:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi(x, y) + 2\pi k_2(x, y), & \varphi(x, y) \leq \frac{\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2\pi k_1(x, y), & \frac{\pi}{2} < \varphi(x, y) \leq \frac{3\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2\pi[k_2(x, y), -1], & \varphi(x, y) \geq \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

1.4.4 融合 SIFT 算子和 GC 全局算法的相位匹配

本系统采用基于区域的绝对相位立体匹配算法, 融合了 SIFT 算子和 GC 全局算法, 针对重复或弱纹理区域匹配误差大的情况, 进行了算法的改进^[18]。对于匹配失败的点, 在视差图中采用线性插值的方式, 进行视差值的填充, 确保三维重建的完整性。

通过极线约束, 将二维图像中的特征搜索过程简化为沿一维直线的线性搜索^[19]。在右相机的图像中, 构建一个与左图像相同大小的窗口, 其中心位置与左图像窗口中心在水平线上对应。然后, 计算基于区域特征的相位匹配的代价。

基于 SSD 的相位匹配的代价为:

$$M_{SSD} = \sum_{i, j \in m} [I_L(x_0 + i, y_0 + j) - I_R(x_0 + d + i, y_0 + j)]^2 \quad (11)$$

基于 SAD 的相位匹配的代价为:

$$M_{SAD} = \sum_{i, j \in m} |I_L(x_0 + i, y_0 + j) - I_R(x_0 + d + i, y_0 + j)| \quad (12)$$

在一定范围 $(0, d_{\max})$ 内, 逐步移动右相机所采集的图像中的窗口位置。在每个窗口位置, 重新计算绝对相位的匹配代价。通过不断比较和更新匹配代价, 最终找到具有最小代价聚合的窗口位置。这一位置所对应的左右相机图像中的窗口中心, 即确定为一对匹配点, 求得的视差作为匹配的初始视差, 图 5 为匹配流程示意图。

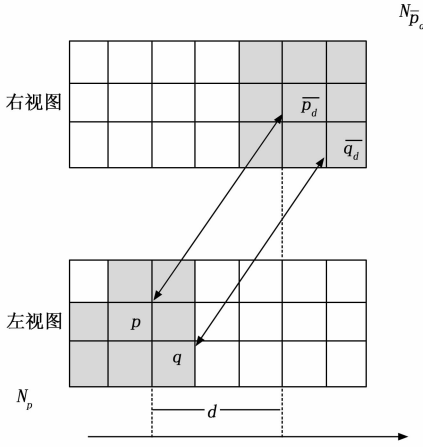


图 5 基于 SAD 的区域特征的匹配算法示意图

之后, SIFT 算法通过检测图像中的局部极值点, 利用高斯金字塔构建多尺度图像^[20], 高斯金字塔的构建公式如下:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (13)$$

其中: $G(x, y, \sigma)$ 是尺度空间中的高斯核函数, 定义为:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

对每个尺度上的局部极值点进行关键点定位, 关键点检测通过寻找差分高斯金字塔中的极值点来实现, 其公式如下:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k * \sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \quad (15)$$

其中: $D(x, y, \sigma)$ 为尺度空间中的差分高斯图像, k 为尺度空间中的常数因子。

通过对局部图像区域的梯度方向进行主方向估计, 并根据梯度方向旋转图像区域, 计算图像梯度方向: $\theta(x, y)$ 和幅度 $m(x, y)$:

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (16)$$

$$m(x, y) = \sqrt{\frac{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2}{2}} \quad (17)$$

进而形成尺度不变的特征描述子。特征描述子利用图像梯度信息构建具有旋转和尺度不变性的特征向量。在左右视图之间, 比较特征描述子的相似性进行特征点匹配。匹配度量通常使用欧式距离进行衡量:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - f'_i)^2} \quad (18)$$

用 RANSAC 方法剔除错误的匹配对, 生成稀疏视差值。RANSAC 的核心思想是通过随机抽样和模型评估来去除异常点, 其迭代过程包括以下几个步骤: 首先, 随机挑选一个最小数据集来拟合一个初始模型; 接着, 评估该模型并计算符合模型的内点数量; 继而, 重复上述抽样和评估的步骤, 直至找到一个包含最多内点的模型为止。最终, 筛选 SIFT 特征点匹配得到的视差值插入到相位匹配得到的视差值中, 提高相位匹配的精度。

GC 全局算法通过构建全局能量函数来计算视差值, 其能量函数优化的基本表达式^[21]如下:

$$\min E(f) = \sum_{p \in I} D_p(f_p) + \sum_{(p, q) \in N} V_{p, q}(f_p, f_q) \quad (19)$$

而数据项 $D_p(f_p)$ 的作用是衡量像素 p 在视差取值 f_p 时的匹配程度函数。 $V_{p, q}(f_p, f_q)$ 为平滑项, 主要衡量了具有邻接关系 N 的像素 p 和 q , 在视差取值 f_p 和 f_q 时的视差平滑程度^[22]。

为避免边缘信息的丢失, 使用 Canny 算子来计算图像灰度梯度的强度和方向, 从而检测待测物体的边缘。由于边缘可能存在的噪声或不确定性, 对检测到的边缘进行膨胀操作, 以扩大边缘的影响范围。

膨胀操作后生成权重掩膜, 引入权重参数 k , 该掩膜在边缘区域的像素上赋予全局立体匹配更高的权重值, 在工件内部的弱纹理区域, 由于纹理信息较少, 相位匹配算法得到的视差值将具有更高的权重, 以补偿全局匹配算法在这些区域的不足。通过双目图像的匹配, 可以为左视图中的每一个像素点在右视图中找到相应的最优的匹配点, 计算这两个点之间的水平距离, 表示物体在场景中距离相机的远近。

通过多特征融合算法, 可以充分利用 SIFT 特征点匹配和全局立体匹配算法的优点。在保持相位匹配在弱纹理区域准确性的同时, 利用 SIFT 算子和全局匹配算法在边缘和特征丰富区域的优势, 从而提高双目视觉系统中工件尺寸测量的精度和鲁棒性。

在得到视差图以后, 会有一小部分点由于遮挡或者匹配失败等原因而产生视差空洞, 对视差空洞的点, 应用线性插值的方法, 根据视差连续性的原理, 利用左右点的视差值获得该点的视差值, 完成视差填充处理^[22]。

在获得图像中所有匹配点后, 根据这些匹配点的水平坐标差值来计算视差。对于左图中匹配失败的点, 采用线性插值方法进行视差填充。线性插值是一种根据一维数据序列中需要插值的点的左右邻近两个数据点来进行数值的估计。若需要获取 $[x_0, x_1]$ 范围中某一点 x 在直线上的值, 可以根据图 6 所示, 结合已知直线上两点 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) , 得到两点式直线方程, 进而求取 x 点

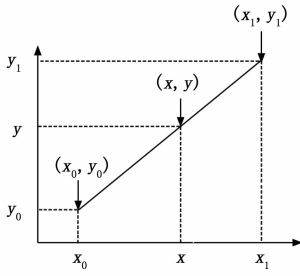


图 6 线性插值示意图

对应的值:

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (20)$$

1.5 三维重建

本系统采用体素栅格重心点滤波法与移动最小二乘法进行点云数据平滑处理结合, 实现高精度的三维点云重构^[23]。避免了工件的三维点云重构后出现过多的空洞以及提高重构表面的平滑性。

点云即像素点的三维坐标 (x, y, z) 可以通过以下公式计算:

$$\begin{aligned} x &= depth * (u - cx) / f_x \\ y &= depth * (v - cy) / f_y \\ z &= depth \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $depth$ 是基于视差计算得到的深度值; f_x 和 f_y 为相机的焦距; cx 和 cy 为图像的光心坐标, (u, v) 为深度与图像坐标, 初始点云数据中存在大量的离群点与冗余点等噪声点, 通过设定体素栅格的边长为 d , 求得 X, Y, Z 坐标轴上的最大值 $x_{\max}, y_{\max}$ 和 $z_{\max}$ 和最小值 $x_{\min}, y_{\min}$ 和 $z_{\min}$ 。则 X, Y, Z 可以被分为 E, F, G 份, 体素栅格个数 $N = E \cdot F \cdot G$:

$$\begin{aligned} E &= \lceil (x_{\max} - x_{\min}) / d \rceil \\ F &= \lceil (y_{\max} - y_{\min}) / d \rceil \\ G &= \lceil (z_{\max} - z_{\min}) / d \rceil \end{aligned} \quad (22)$$

通过计算每个体素栅格区间的重心点, 记为 g , 每个区间只保留相应的重心点, 这样即可去除大量冗余点云数据, 提高重构表面的平滑性:

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (23)$$

其中: n 为体素栅格中的数据点个数, p_i 为点云数据。

为了进一步提高三维模型重构的精度和效果, 本系统结合使用移动最小二乘法进行点云数据平滑处理, 通过数据建模建立曲面的拟合函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m a_i(x) p_i(x) = p^T(x) a(x) \quad (24)$$

式中, $a(x) = A^{-1}(x) B(x) y$, $a(x)$ 为待定系数向量, 其中:

$$A(x) = \sum_{i=1}^m w(x - x_i) p^T(x_i) a(x_i) \quad (25)$$

其中: $w(x - x_i)$ 为节点 x_i 的权函数, $y = [y(x_1), y(x_2), y(x_3), \dots, y(x_m)]^T$, $p(x) = [p_1(x), p_2(x), p_3(x), \dots, p_m(x)]^T$ 为基函数, m 为基函数项数。通过调用不同的基函数和权函数调整仿真曲面的光滑度与精度, 实现对真实曲面的拟合。从而优化点云数据的平滑度, 实现高精度的三维点云重构。

2 实验结果与分析

2.1 实验环境的配置

本项目搭建的测量实验平台配备了双目摄像机、结构光投影仪以及载物平台。投影仪是分配率为 $1\,280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ 的 Dell M110, 双目相机则选用了大恒 GigE 相机, 搭配 8 mm 的日本 Computar 镜头, 图像分辨率达到 $2\,448 \text{ pixel} \times 950 \text{ pixel}$ 。通过对光条的位置信息进行编码以及解码实现左右视图中像素点的高精度匹配, 结合本系统的工件三维重建系统完成物体表面高精度三维测量。在系统软件的开发过程中, 使用了 Visual Studio 2019、OpenCV、Matlab 以及 PyCharm 等软件作为核心开发环境。

2.2 编码结构光图像的采集

相移条纹投影测量系统融合了四步相移技术和互补格雷码相位展开技术, 以实现高精度的测量。在系统采集图像的过程中, 预先投射一幅全亮和一幅全黑的图案, 生成掩码图像去除无关背景; 依次投射四幅相移图案, 其相位依次为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$, 确保解相位过程中获得完整的相位信息。系统进一步投射生成的 4 位格雷码及一位互补格雷码编码图案, 提供额外的空间编码信息。在整个过程中, 系统同步捕获投射编码图案后采集的左右相机的图像。系统在实验中捕获的 4 个工件在格雷码与四步相移码的投影图案如图 7 所示。

2.3 双目相机的标定和极线校正

在双目相机标定中, 双目相机拍摄了不同角度的 30 组棋盘格图像。通过采用张正友标定法, 精确提取高精度小标定板的角点网格信息^[23], 完成了双目相机标定参数的计算。

图 8 (a) 是相机标定结束后得到的标定视图, 展示了在空间坐标系下左右双目相机的位姿和采集的标定板的位置。图 (b) 是标定的重投影误差直方图, 从直方图中多组数据的误差大小可以判别此次标定的精确度。为了确保标定的准确性, 对于误差值较大的图像组进行剔除, 重新执行相机标定过程, 最终选用了 20 组棋盘格标定图像。

重投影误差是指在相机标定过程中, 将三维世界坐标系中的点通过相机模型投影到二维图像平面上, 反映与实际在图像中检测到的特征点之间的差异, 偏差越小

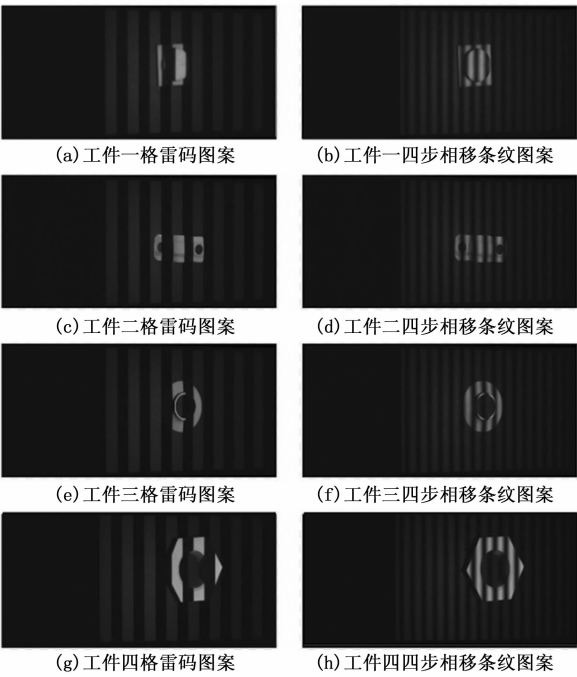


图 7 左目相机捕获的投影图案

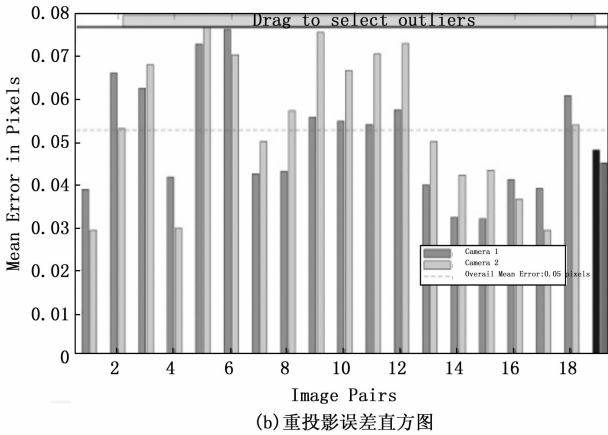
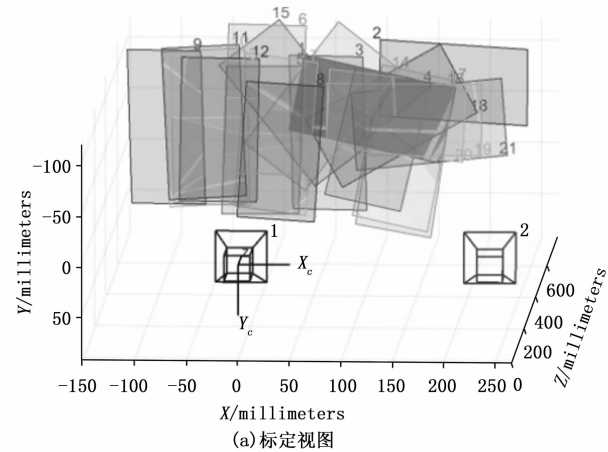


图 8 标定结果示意图

说明标定结果越准确。通常情况下, 双目标定误差值在 0.3 pixels, 以下表示达到了可接受的精度水平。在本

次实验中, 标定后的结果表明平均重投影误差约为 0.05 pixels, 这一数值远低于可接受误差的阈值, 因此相机标定达到了预期的精度效果。

经相机标定, 左摄像机畸变参数为 $[-0.084\ 3\ 0.103\ 7\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 内参矩阵为 $\begin{bmatrix} 2\ 351.63 & 0 & 1\ 245.63 \\ 0 & 2\ 352.16 & 456.66 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; 右摄像机畸变参数为 $[-0.087\ 3\ 0.099\ 5\ 0\ 0\ 0\ 0]$, 内参矩阵为 $\begin{bmatrix} 2\ 354.58 & 0 & 1\ 242.68 \\ 0 & 2\ 354.40 & 465.49 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。基于此标定结果, 进一步确定相机外参数, 平移矩阵 T 为 $[-243.609\ 1\ 0.017\ 5\ 5.823\ 5]$, 旋转向量 r 为 $[-0.001\ 2\ -0.054\ 3\ 0.002\ 3]$, 所测得的左右相机的内参矩阵 K 表示为:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & c & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{26}$$

式中, c 为一个常数, f_x 和 f_y 为焦距在 u 轴和 v 轴方向上的位置, u_0 、 v_0 为相机感光板中心在像素坐标系下的坐标。

左右相机的 r 和 T 分别表示两个相机坐标系之间的旋转矩阵和平移向量, r 为右相机坐标系相对于左相机坐标系旋转关系, T 为右相机坐标系相对于左相机坐标系的位置偏移。

在基于精准双目标定的基础上, 该系统对采集工件的左右图像进行了极线校正。通过极线处理, 将左右两幅图像中对应特征点的水平对齐, 从而实现了行对齐, 简化了后续的立体匹配的处理步骤, 提高了匹配的效率。

2.4 获取图像的绝对相位信息

直接结合格雷码条纹阶次和包裹相位的信息进行相位展开算法, 求得的绝对相位有小部分像素点出现相位跳变。本文利用互补格雷码来校正周期错位, 消除边缘相位跳变, 获得平滑、连续绝对相位。所获得的目标工件的绝对相位图如图 9 和图 10 所示。

2.5 双目匹配和三维重建效果的对比分析

针对低纹理区域的工件, 本实验融合 SIFT 边缘特征与全局立体匹配的相位匹配算法, 实现了对目标物体的精准匹配, 并进行了三维重建的实验研究。在实验过程中, 对比了基于区域特征的 SAD、SSD 匹配算法以及传统的相位匹配算法和本文改进的相位匹配算法, 其匹配结果所得到的视差如图 11 所示, 三维重建结果如图 12 所示。

通过图 11 中生成的视差图, 对比本文改进的相位匹配算法及传统立体匹配算法对目标工件的匹配效果,

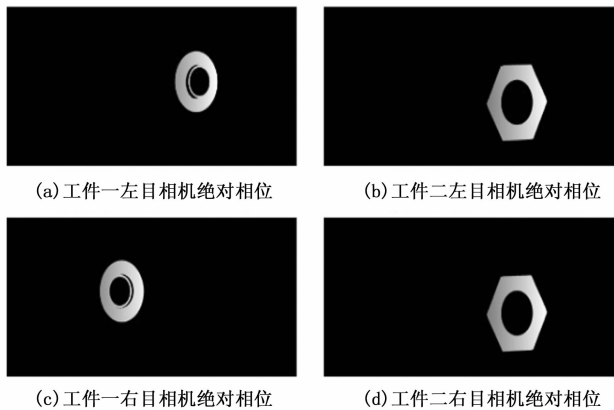
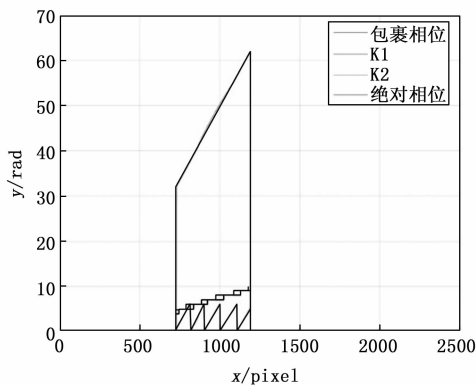


图 9 工件的双目绝对相位图

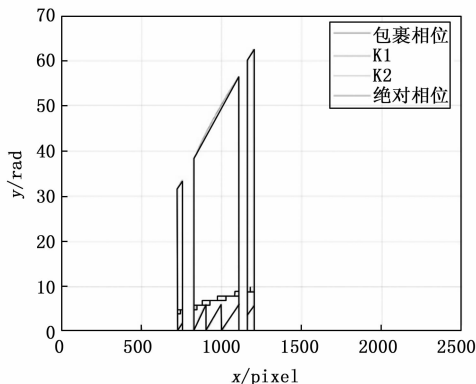
可以看出传统算法的目标工件的视差图中内部存在许多空洞和边缘模糊不清的问题,并且存在较多的误匹配点,特别是在目标工件的边缘区域。本文的改进算法匹配得到的目标工件的视差图填充了内部的空洞,工件的边缘轮廓相对平滑,匹配的改进效果明显。

通过匹配后生成的视差图进行三维重建,在图 12 中展示了不同匹配算法下三维重建的效果图。传统算法对图片可以进行一定程度上的重建,但是点云离散化无法对目标工件进行较为完整、准确的恢复,且三维重建中的工件边缘处的点云数据明显错误,导致对工件的重建效果达不到实际的应用要求。而本文的优化算法能够有效对目标工件的三维信息进行重建,充分证明了本算法用于三维重建的有效性,特别是在处理复杂纹理和边缘细节时,本文算法展现出了更高的鲁棒性和适应性,能够更准确地重建目标工件的表面形貌。

为了检验本文改进的相位匹配算法的效果,基于第一组实验图片,对基于 SAD 的相位匹配算法、基于 SSD 的相位匹配算法、基于 AD 的匹配算法与本文改进的算法进行验证和比较,如表 1 所示。通过详细的实验数据对比,可以清晰地看到本文的算法在匹配准确率上相较于传统算法有了显著地提高。这一结果表明,本文



(a) 第450行绝对相位信息



(b) 第500行绝对相位信息

图 10 绝对相位信息解码数据图

的改进算法优化了相位匹配过程中的关键步骤,提升了匹配的准确性和稳定性。

融合全局立体匹配与 SIFT 边缘特征的相位匹配算法在处理低纹理区域时具有独特的优势。该算法通过全局立体匹配算法对图像进行整体分析,同时结合 SIFT 边缘特征检测算法,对图像中的局部边缘进行了精确匹配,这种融合策略有效地提升了三维重建的精度和鲁棒性。

对于工件这类低纹理目标,传统的三维重建方法往往因为表面纹理信息不足而难以准确提取形状和轮廓信

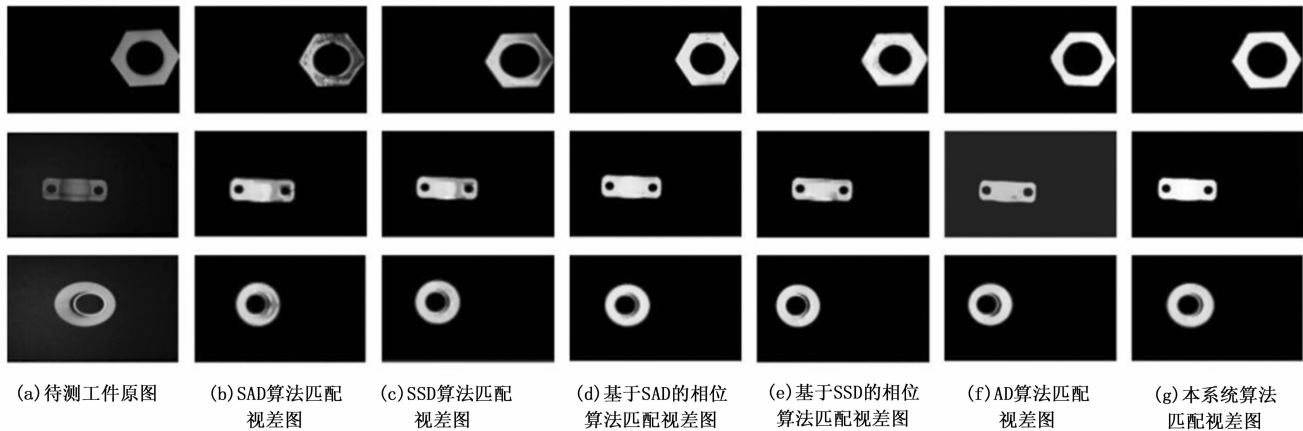


图 11 双目匹配结果对比示意图



图 12 不同匹配算法下三维重建结果示意图

表 1 不同算法的匹配正确率

使用方法	正确匹配点	正确率/%
基于 SAD 的相位匹配	28 497	91.80
基于 SSD 的相位匹配	29 732	90.45
AD 匹配	24 756	79.75
本文算法	30 052	95.54

息,在某些区域还会产生数据空洞。本实验中的优化算法能够准确地识别并提取出工件的形状和轮廓信息,同时有效地填补了由于表面低纹理导致的局部数据空洞,提高了三维重建的准确性和完整性。

3 结束语

基于现有技术基础,本文对双目结构光的三维重建进行了研究。针对传统匹配算法在弱纹理区域匹配表现不佳,边缘视差精度低、误差大的问题,采用结构光向待测工件投射编码图案增加表面的纹理信息;通过互补格雷码和相移法消除跳变误差,获得目标物体光滑连续的绝对相位;结合双目视觉的优势,基于相位信息,融合 SIFT 边缘特征与全局立体匹配进行相位匹配得到视差图;最后,对视差空洞进行填充,得到深度信息,完成目标工件的三维点云重建。

实验结果表明,采用上述的双目结构光系统能优化了立体匹配的精度,根据优化算法获取的视差图重建的三维点云数据更加稠密,能恢复出工件的表面形貌。证实了该系统能够有效地抵抗环境噪声和光照变化的影响,在三维重建中具有广泛的应用前景,为弱纹理匹配提供了可靠的技术支持,适用于低成本、高精度的不同场景。

参考文献:

[1] 付鲁华,冯 菲,王 鹏,等. 网格结构光视觉位姿测量系统设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (5): 117 - 124.

[2] 张博霄,于佳慧,焦小雪,等. 线结构光双目融合补缺重建技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (16): 196 - 203.

[3] 刘建春,刘 轩,蒋炳翔,等. 复杂纹理工件的位姿检测方法研究 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (2): 50 - 56.

[4] 郑文迪,陈 胜. 基于改进的格雷码法的三维重建系统 [J]. 理论数学, 2023, 13 (4): 957 - 967.

[5] 陆丽莲,吴周杰,张启灿. 基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法 [J]. 光学学报, 2022, 42 (5): 103 - 112.

[6] 刘玉红,李 锋. 基于格雷码一相移的高反光表面三维测量研究 [J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (4): 803 - 808.

[7] 赵冬青,畅雅雯,单彦虎,等. 双目测量系统的室内定位与重建 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (1): 19 - 23.

[8] 陈亦麟,王发宇,刘建阳. 基于双目立体视觉与结构光的便携式非接触三维掌纹采集系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (4): 200 - 208.

[9] 赵晓东,李 彤,李 翔,等. 基于双目结构光的轨道车辆关键零部件三维重建算法研究 [J]. 国外铁道车辆, 2022, 59 (2): 6 - 11.

[10] 王 浩. 接触线双目视觉测量系统标定及立体校正方法研究 [J]. 制造业自动化, 2019 (3): 97 - 101.

[11] 任继昌,杨晓东. 极线约束条件下的双目视觉点匹配策略研究 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38 (2): 121 - 124.

[12] 贾 帅,王 涛,张 金. 基于双目视觉的轴类零件直径测量方法 [J]. 煤矿机械, 2021, 42 (8): 221 - 223.

[13] 赵焕谦. 基于结构光和双目视觉的三维重建系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.

[14] 尹丽萍,于晓洋,吴海滨. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12 (5): 5 - 7.

[15] 严 飞,祁 健,刘银萍,等. 基于格雷码的分区间相位展开方法 [J]. 应用光学, 2023, 44 (1): 79 - 85.

[16] 李 洋,李 岩,赵爱国,等. 四步相移结合互补格雷码的快速相位展开 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (2): 36 - 41.

[17] 张朝财,张 薇,周德峰,等. 基于短基线双目内窥镜成像系统的 3D 视频标定与校正 [J]. 光学仪器, 2023, 45 (3): 30 - 36.

[18] 肖汝宁,周金治. 改进格雷码结构光双目视觉工件 3D 测量 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 30 - 33.

[19] 杜永峰,马天军,韩 博,等. 基于尺度不变特征变换算法 (SIFT) 立体匹配的结构三维振动位移监测 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (12): 105 - 134.

[20] 黄松梅,毕远伟,许 晓. 双目立体匹配算法的研究与实现 [J]. 鲁东大学学报 (自然科学版), 2018 (1): 25 - 30.

[21] 田婷婷,高瑞贞,张京军. 基于区域插值的视差图平滑算法及三维重建 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2020, 51 (5): 893 - 898.

[22] 杨洪涛,陆广慧,沈 梅. 基于双目视觉的齿轮三维点云精确重构方法研究 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42 (10): 56 - 59.

[23] 唐娟娟,张正平,周 骅,等. 基于 Matlab 的结构光系统标定及三维重建 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41 (8): 144 - 148.