

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.012

## 基于点阵结构光的三维曲面测量技术

何俊杰<sup>1,2</sup>, 赵季康<sup>1,2</sup>, 王天琪<sup>1,2</sup>, 董广宇<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387; 3. 中科极控(天津)科技有限公司, 天津 300380)

**摘要:** 针对工业机器人空间曲面的三维测量和智能规划需求, 开发一种采用点阵光源的智能视觉传感器, 并采用该视觉传感器进行标定和曲面测量。首先, 提出一种“由点到线”的两步法标定策略, 确定点阵光源各激光线在工业相机坐标系下的方程; 对点阵光源图像进行 HSV 颜色通道分离; 利用高斯拟合法提取点阵光斑的质心坐标, 按照点阵分布对其进行编码排序, 并利用靶标平面的约束计算出相机坐标系中各点阵的三维坐标; 分别拟合出点阵所在行列平面方程, 确定激光发射点的位置; 通过奇异值分解获取各光线的向量, 完成点阵结构光的标定。其次, 在完成点阵结构光标定基础上, 对光斑三维坐标采用最小二乘法进行三维曲面重构。最后, 通过雷达天线罩模型曲面测量及重构实验验证所提出的点阵光源视觉传感器标定算法的有效性。实验结果表明: 采用该方法可以实现对雷达天线罩工件曲面的快速、准确测量要求, 本文实验条件下标定误差范围为 0.6%~1.1%, 测量误差满足实验精度要求。

**关键词:** 点阵结构光; 标定; 雷达天线罩; 曲面测量; 三维重构; 视觉传感器

中图分类号: TH741; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0078-06

### 3D curved surface measurement technology based on lattice structured light

HE Junjie<sup>1,2</sup>, ZHAO Jikang<sup>1,2</sup>, WANG Tianqi<sup>1,2</sup>, DONG Guangyu<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechanical Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Zhongke Polar Control (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of 3D measurement and intelligent planning of space surface of industrial robot, an intelligent vision sensor using dot matrix light source is developed for calibration and curved surface measurement. Firstly, a two-step calibration strategy of "point-to-line" is proposed to determine the equation of each laser line in the coordinate system of the industrial camera. The dot-matrix light source image is separated with the HSV color channels. Gaussian fitting method is used to extract the centroid coordinates of the lattice spots, to encode them according to the lattice distribution, and to use the target plane constraints to calculate the three-dimensional coordinates of each lattice in the camera coordinate system. Then the row and column plane equations where the lattice is located are fitted respectively to determine the position of the laser emission point, and the vector of each ray is obtained by singular value decomposition to complete the calibration of lattice structured light. Secondly, on the basis of the dot-matrix structured light calibration, the three-dimensional surface of the spot coordinates is reconstructed by the least square method. Finally, the effectiveness of the proposed dot-matrix vision sensor calibration algorithm is verified through the measurement and reconstruction experiments of the radar radome model curved surface. The experimental results show that this method can be used to measure the surface of radome workpiece quickly and accurately. Under the experimental conditions, the calibration error range is 0.6%—1.1%, and the measurement error meets the experimental accuracy requirements.

**Key words:** lattice structured light; calibration; radar radome; curved surface measurement; 3D reconstruction; vision sensor

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975410); 天津市科技特派员项目(20YDTPJC00780); 天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202053)

第一作者: 何俊杰(1973—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器人控制技术。E-mail: 1547886762@qq.com

通信作者: 王天琪(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器人视觉控制。E-mail: wtq0622@163.com

结构光视觉传感器<sup>[1-2]</sup>因其高精度、高效率在有关曲面检测<sup>[3-4]</sup>、三维重构<sup>[5-6]</sup>等领域被广泛应用。随着科学技术的进步以及科技力量的逐渐壮大,结构光视觉<sup>[7]</sup>将具有广泛的应用前景。

结构光测量技术<sup>[8-9]</sup>采集到的曲面数据具有较高的精度和效率,而结构光视觉传感器的高精度标定奠定了结构光测量技术的有效性。目前结构光视觉传感器的标定方法<sup>[10-12]</sup>研究主要针对线结构光<sup>[13-14]</sup>,对点阵结构光标定方法的研究较少。在对自由曲面构件的测量中,点阵结构光能为曲面工件的三维测量或定位提供更多的工件表面信息,更有利于工业机器人的智能定位和规划<sup>[15-16]</sup>。对于点阵结构光的应用,主要是熔池自由表面三维信息的采集。李春凯等<sup>[17]</sup>基于点阵激光视觉提出了一种对熔池表面的测量方法,采用光的反射原理,建立了熔池表面标准模型,提取了熔池表面的三维信息。张刚等<sup>[18]</sup>为研究电弧对熔池的耦合作用,控制焊缝成型质量,提出使用点阵激光测量熔池表面特征的方法,并提取熔池高度与宽度尺寸,与实际结果对比较好。

本文提出一种“由点到线”两步法的点阵结构光的标定策略,根据结构光测量法测得的天线罩表面点云数据,以最小二乘法为工具,实现曲面的三维重构,为后续精密加工的轨迹规划奠定坚实基础。

### 1 点阵结构光视觉传感器测量模型

视觉系统的标定主要是获得不同坐标系之间的位姿关系。该系统中的相机成像符合小孔成像模型<sup>[9]</sup>,点阵激光发生器发射出形如四棱锥、投影形状为矩形的点阵。点阵结构光视觉测量模型如图 1 所示。

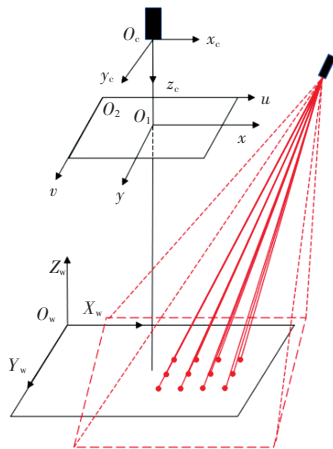


图 1 点阵结构光视觉测量模型

Fig.1 Visual measurement model of lattice structured light

图 1 中:  $O_1-xy$  为图像坐标系;  $O_2-uv$  为像素坐标

系;  $O_c-x_c, y_c, z_c$  为相机坐标系;  $O_w-x_w, y_w, z_w$  为世界坐标系;  $O_c$  为相机坐标系的原点;  $O_1$  为图像坐标系的原点;  $O_cO_1$  垂直于图像坐标系、世界坐标系,  $O_cO_1$  为摄像机的焦距  $f$ 。假设每个像素点在  $x$  轴方向的物理尺寸为  $d_x$ ,而在  $y$  轴方向的物理尺寸为  $d_y$ ,坐标系一点的像素坐标为  $(u, v)$ ,与之对应的世界坐标为  $(x_w, y_w, z_w)$ 。

根据相机的小孔成像模型,世界坐标系与相机坐标系之间的变换关系如式(1)所示,将图像像素坐标系下的坐标进行投影变换,并建立其与世界坐标系对应点的转换关系。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{in}^c \mathbf{M}_w \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $s$  为比例系数;  $(u, v)$  为像素坐标;  $\mathbf{M}_{in}$  为相机的内部参数;  $f_x, f_y$  分别为相机在  $x$  轴、 $y$  轴方向上的放大系数;  $(u_0, v_0)$  为图像坐标系下光心坐标;  $\mathbf{M}_w$  为相机的外部参数;  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  分别为世界坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵。

基于上述理论,本文提出一种点阵结构光标定算法,标定流程如图 2 所示。

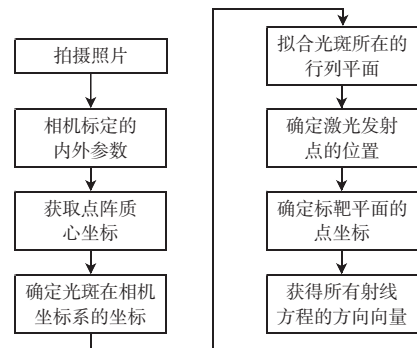


图 2 点阵结构光标定算法流程

Fig.2 Flow of lattice structured cursor setting algorithm

为便于准确地定位与识别光斑位置,需要对光斑进行编码排序。由于本文采用的是二维标靶,所以光斑的排布遵循顺序一致性。如图 3 所示,点阵激光发射点  $O_s$  发出  $i \times j$  条光线,则可将点阵光斑按照相同序列编码。

若已知激光发射顶点  $O_s$  的坐标位置和相机坐标系下各个标靶位置所在空间平面上投射光斑点阵的坐标,就能确定各条直线的方向向量  $\mathbf{F}_{i,j}$ ,即可建立点

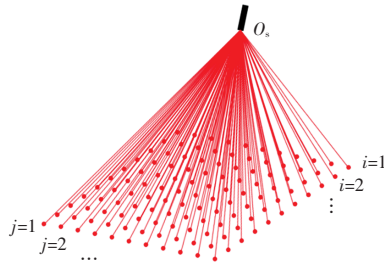


图3 点阵光斑的编码

Fig.3 Coding of lattice spots

阵结构光的空间直线方程  $L_{i,j}$

$$\frac{x-x_0}{F_{i,j}(1)} = \frac{y-y_0}{F_{i,j}(2)} = \frac{z-z_0}{F_{i,j}(3)} \quad (2)$$

综上所述,通过点阵结构光的标定,即可实现对各条直线方向向量的求取及激光发射顶点坐标位置的确定。

## 2 点阵结构光传感器标定

点阵结构光标定是为了获取点阵射线相对于相机的位姿关系。首先每幅标靶图中棋盘格的标靶坐标系是已知的,标靶坐标系即为世界坐标系。每幅标靶平面在进行相机标定时已确定了标靶坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ 。棋盘格角点在标靶坐标系下的位置可通过式(1)转换到相机坐标系下的坐标。将坐标进行平面拟合,可得到二维标靶在相机坐标系下的平面方程:

$$A_n x + B_n y + C_n z + 1 = 0 \quad (3)$$

假设第  $n$  张标靶图像中的光斑点  $P$  的图像坐标为  $({}^n u_{i,j}, {}^n v_{i,j})$ , 根据式(4)可转换到相机坐标系下  $({}^n x_{i,j}, {}^n y_{i,j}, {}^n z_{i,j})$ 。

$$\begin{cases} {}^n x_{i,j} = \frac{({}^n u_{i,j} - u_0) {}^n z_{i,j}}{f_x} \\ {}^n y_{i,j} = \frac{({}^n v_{i,j} - v_0) {}^n z_{i,j}}{f_y} \\ {}^n z_{i,j} = \frac{D_n}{\frac{A_n({}^n u_{i,j} - u_0)}{f_x} + \frac{B_n({}^n v_{i,j} - v_0)}{f_y} + C_n} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $(u_0, v_0)$  为图像坐标系中相机的光心坐标;  $f_x, f_y$  分别为相机在  $u$  和  $v$  方向上的放大系数;  $A_n, B_n, C_n$  为标靶平面方程参数。

假设共拍摄  $n$  张照片,根据式(5)得到每条光线上的  $n$  组点。按照点阵行列排布次序,根据最小二乘法拟合出点阵所在行列平面  $\Pi_i, \Pi_c$ 。

$$\begin{cases} \Pi_i: A_i x + B_i y + C_i z + 1 = 0 \\ \Pi_c: A_c x + B_c y + C_c z + 1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r, c$  分别表示行、列平面;  $i, j$  分别为平面个数。最终得到的平面方程数量为  $i + j$ , 根据空间中任意 3 个不完全平行的平面可交于一点的原理, 共得到  $C_{i+j}^3$  个点, 取其平均值后作为对激光发射点的坐标  $O_s$ 。

至此,每条光线上点的数量为  $n + 1$ , 经过奇异值分解,如式(6)所示,求得各条光线的方向向量。

$$J = \begin{bmatrix} {}^1 x_{i,j} - \overline{{}^1 x_{i,j}} & {}^1 y_{i,j} - \overline{{}^1 y_{i,j}} & {}^1 z_{i,j} - \overline{{}^1 z_{i,j}} \\ {}^2 x_{i,j} - \overline{{}^2 x_{i,j}} & {}^2 y_{i,j} - \overline{{}^2 y_{i,j}} & {}^2 z_{i,j} - \overline{{}^2 z_{i,j}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^{N+1} x_{i,j} - \overline{{}^{N+1} x_{i,j}} & {}^{N+1} y_{i,j} - \overline{{}^{N+1} y_{i,j}} & {}^{N+1} z_{i,j} - \overline{{}^{N+1} z_{i,j}} \end{bmatrix} = U \Sigma V^T \quad (6)$$

式中:  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  为单条光线上  $N + 1$  组点的平均值;  $V = [F_{i,j}(1), F_{i,j}(2), F_{i,j}(3)]$ , 即式(2)的方向向量,从而实现点阵结构光的标定。

## 3 实验验证与分析

搭建点阵结构光视觉测量系统,如图4所示。图4中:工业机器人为 ABB 公司的 1410 型六自由度机器人;点阵光源采用波长为 650 nm 的点阵激光发生器,光线数量排布为  $11 \times 11$ , 功率为 100 mW;相机选用德国 AVT 公司的 Manta G-031C 型的 CCD 相机;二维标靶选用  $11 \times 8$  的棋盘格标靶,每个棋盘单元格大小为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 标定板制造精度为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ ;雷达天线罩为 3D 打印模型,精度为  $0.01 \text{ mm}$ 。

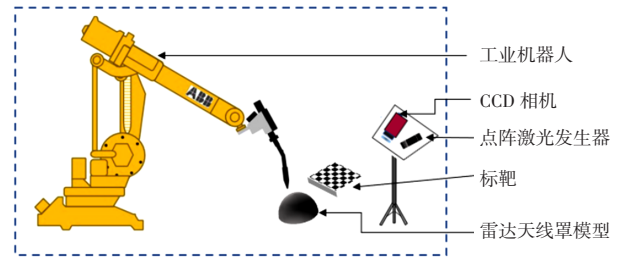


图4 点阵结构光视觉测量系统

Fig.4 Visual measurement system of lattice structured light

通过使用机器人末端焊枪示教标靶 3 个顶点,利用三点法得到标靶坐标系  $\{C\}$  与机器人基坐标系  $\{B\}$  的位姿关系,通过相机标定得到标靶与相机的位姿关系  ${}^c_c T$ , 最终能得到相机与工业机器人的位姿关系  ${}^B_c T$ :

$${}^B_c T = {}^B_c T \times {}^c_c T \quad (7)$$

### 3.1 相机标定

对棋盘格采集 15 张不同位置的图像,使用 Harris 算法检测角点,获取棋盘格上所有角点的像素坐标。通过张正友标定法<sup>[20]</sup>,得到相机的内外参数以及畸变

系数,如表 1 所示。经标定,相机标定重投影误差为 0.09 pixes,满足标定需求。

表 1 标定结果  
Tab.1 Calibration results

参数	标定结果
内参矩阵	$\begin{bmatrix} f_x & f_y & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1840.439 & -0.072 & 341 & 967.048 \\ 0 & 1841.825 & 714.316 & \\ 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix}$
外参矩阵	$15 \text{ 组} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$
畸变系数	$k_1 = -0.10011, k_2 = 0.1953, k_3 = -0.018942$ $p_1 = 0.0005699, p_2 = -0.0002165$

### 3.2 点阵结构光标定

在对光斑提取过程中,由于在黑白棋盘格不同颜色的背景下,光斑会呈现出不同的半径和颜色,白格中光斑半径较大且颜色外红内白,黑格中光斑半径较小且颜色外圈为红色,内部偏黄色。采用 HSV 颜色通道方法分离光斑,提取出白格中明度最高且色度最高的位置,黑格中明度最高且色度偏低的位置,这样可避免因半径和颜色不同对质心提取带来的影响。将分离出的光斑使用形态学变换对质心位置进行处理,最后采用高斯拟合法<sup>[21]</sup>确定质心坐标,如图 5 所示。

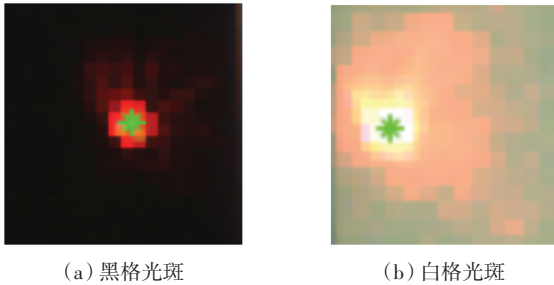


图 5 黑白格光斑质心

Fig.5 Centroid of black and white lattice spot

对 6 组光斑中心点坐标进行奇异值分解,得到 121 条直线的方向向量,最终得到各条光线的标定参数,完成光线参数的标定,如表 2 所示。

表 2 点阵结构光光线方程(局部)

Tab.2 Lightray equation of lattice structured light(Part)

$O_s(x_0, y_0, z_0)$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
(69.48, 25.03, 73.86)	0.422 305	0.108 27	0.157 97
	0.425 576	0.110 58	0.134 62
	0.428 842	0.112 88	-0.111 30
	⋮	⋮	⋮

分别与激光发射点结合,确定激光束的各条直线方程,图 6 为拟合出的激光直线图。

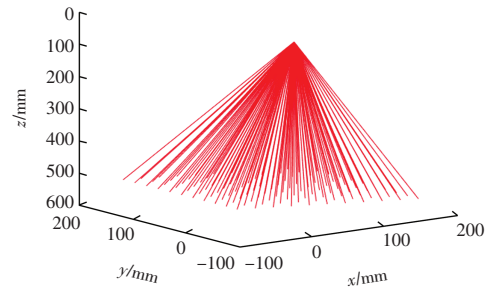


图 6 点阵光束

Fig.6 Lattice beam

### 3.3 雷达天线罩三维重构

在进行三维重构时,通过高斯拟合法提取出光斑中心,将天线罩表面的光斑像素坐标 $(u, v)$ 转换到相机坐标系下 $(x_c, y_c, z_c)$ 。根据点阵结构光相对相机的空间位置,选择按照光线所在列的方向拟合光平面方程 $\Pi_c$ 。

首先,将光斑中心像素坐标归一化:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{in}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{M}_{in}^{-1}$ 为摄像机内参数的逆矩阵;下角 p 表示归一化平面。然后,将归一化坐标转换到摄像机坐标系下:

$$\begin{cases} x_c = -x_p / (A x_p + B y_p + C_c) \\ y_c = -y_p / (A x_p + B y_p + C_c) \\ z_c = -1 / (A x_p + B y_p + C_c) \end{cases} \quad (9)$$

将得到的工件表面三维信息,根据最小二乘法对其进行三维重构,图 7 所示分别为雷达天线罩模型及其三维重构。

### 3.4 标定精度与测量误差分析

为验证上述标定方法结果的准确性,分别对点阵结构光的标定误差以及三维测量误差进行分析。图 8 为各行列方向中相邻 2 条直线夹角平均值,已知每 2 条相邻直线的标准夹角为  $2.900^\circ$ ,经计算,每行中相邻两直线夹角的平均角度中最小值和最大值分别为  $2.879^\circ$ 、 $2.932^\circ$ ,标定误差范围在 0.7%~1.1%;每列中相邻两直线夹角的平均角度中最小值和最大值分别为  $2.882^\circ$ 、 $2.929^\circ$ ,标定误差范围在 0.6%~1.0%。

完成点阵结构光标定误差分析后,将结构光投射到雷达天线罩模型表面,通过计算结构光光斑空间坐标到模型表面的欧式距离,来验证点阵结构光的测量误差。首先示教雷达天线罩上 3 个正交且共面的位置,建立天线罩坐标系{P},得到与机器人基坐标系{B}的位姿关系 ${}^P_B T$ ;然后将天线罩表面的光斑从相机坐标系下转换到工件坐标系下;最后计算光斑到天线罩曲面的欧氏距离,如图 9 所示,距离范围在  $1.70 \times 10^{-4}$ ~

$1.23 \times 10^{-2} \text{ mm}$  之间,满足实验精度要求。

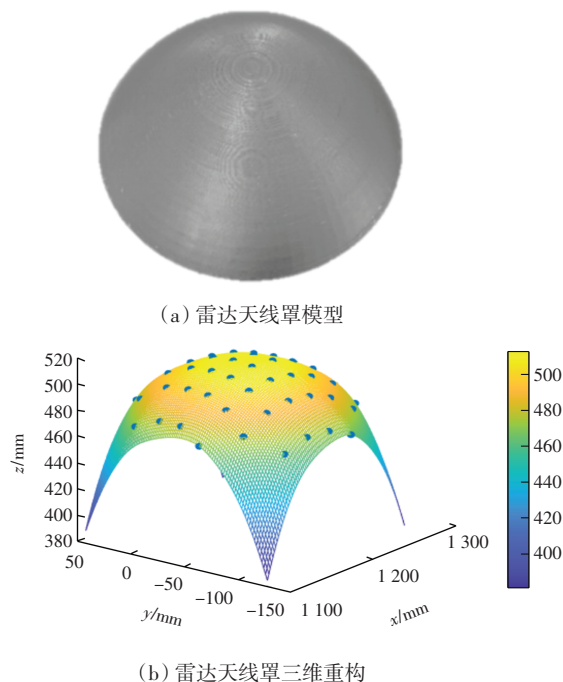


图7 雷达天线罩模型及其三维重构图

Fig.7 Model of radar radome and its three-dimensional reconstruction

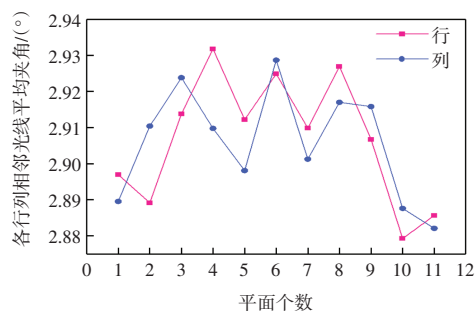


图8 点阵结构光标定误差

Fig.8 Calibration error of lattice structured light

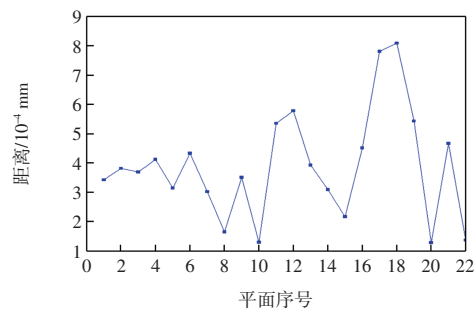


图9 点阵结构光测量误差

Fig.9 Measurement error of lattice structured light

## 4 结 语

本文提出一种“由点到线”两步法的标定策略,首

先获取激光发射点在相机坐标系下的位置,其次找到光束中每条激光光线的方向向量,最终确定点阵结构光在相机坐标系下的位姿关系。根据点阵视觉系统提取了雷达天线罩表面的三维信息,并实现了雷达天线罩轮廓曲面的三维重构。分别通过计算点阵光束各个行列相邻两条直线的平均角度、光斑到三维表面的欧式距离来分析点阵结构光的标定误差和测量误差,进行精度验证。本文试验条件下,标定误差范围在0.6%~1.1%,测量误差也在允许范围之内,且该标定方法快速、精确,可满足大部分工件的测量需求。

## 参考文献:

- [1] 赖仁杰. 基于视觉信息的六自由度串联机械臂基座坐标系标定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
LAI R J. Calibration of base coordinate system of 6-DOF series manipulator based on visual information[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] 牛萍娟, 刘雷. 基于神经网络的毫米波雷达与视觉传感器联合标定方法[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(5):64-69.  
NIU P J, LIU L. Joint calibration method of millimeter wave radar and vision sensor based on neural network[J]. Journal of Tiangong University, 2019, 38(5):64-69(in Chinese).
- [3] LI S P, LI D, ZHANG C H, et al. RGB-D image processing algorithm for target recognition and pose estimation of visual servo system[J]. Sensors, 2020, 20(2): 430.
- [4] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [5] BUYTAERT J A N, DIRCKX J J J. Moiré profilometry using liquid crystals for projection and demodulation[J]. Optics Express, 2008, 16(1): 179-193.
- [6] 朱可, 霍彦文, 武通海, 等. 基于光度立体视觉三维重构算法的微观磨损形貌原位测量原理及方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10):1-9.  
ZHU K, HUO Y W, WU T H, et al. Principle and method of in-situ measurement of micro-wear morphology based on 3D reconstruction algorithm of photometric stereo vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 201, 57(10):1-9 (in Chinese).
- [7] 李小艳. 机器人用双目视觉的三维重构技术实验研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(7):84-85.  
LI X Y. Experimental research on 3D reconstruction technology of binocular vision for robot[J]. Materials for Information Recording, 2019, 20(7):84-85(in Chinese).
- [8] 李栋. 结构光视觉高精度测量与工件位姿识别[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
LI D. Structured light vision high-precision measurement and workpiece pose recognition[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).

- [9] 刘祥,王振亮,姚鹏,等.三维形貌的线结构光精密旋转测量与误差补偿方法[J].中国激光,2022,49(21):121-135.  
LIU X, WANG Z L, YAO P, et al. Precision rotation measurement and error compensation method of linear structured light with three-dimensional morphology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21):121-135(in Chinese).
- [10] LIU B, YANG F, HUANG Y X, et al. Single-shot three-dimensional reconstruction using grid pattern-based structured-light vision method[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10602.
- [11] ZHU Y, WANG L P, GU Y G, et al. Three-dimensional inner surface inspection system based on circle-structured light[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(12): 121007.
- [12] WANG Z Z, ZHOU Q, SHUANG Y C. Three-dimensional reconstruction with single-shot structured light dot pattern and analytic solutions[J]. Measurement, 2020, 151: 107114.
- [13] YU H T, HUANG Y, ZHENG D L, et al. Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot[J]. Optik, 2020, 202: 163656.
- [14] PING Y S, LIU Y K. A calibration method for line-structured light system by using sinusoidal fringes and homography matrix[J]. Optik, 2022, 261: 169192.
- [15] 武金超. 铺丝机器人轨迹规划及其末端振动特性分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.  
WU J C. Trajectory planning and terminal vibration characteristics analysis of silk laying robot[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019(in Chinese).
- [16] 刘志福. 大型风机叶片复合材料铺放路径规划研究与实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2010.  
LIU Z F. Research and implementation of laying path planning of composite materials for large fan blades[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2010(in Chinese).
- [17] 李春凯,石玓,顾玉芬,等. GTAW 熔池三维表面激光点阵反射特征的仿真与优化[J]. 焊接学报, 2017, 38(9):42-46, 131.  
LI C K, SHI Y, GU Y F, et al. Simulation and optimization of laser lattice reflection characteristics on three-dimensional surface of GTAW weld pool [J]. Transactions of the China Welding Society, 2017, 38(9):42-46, 131(in Chinese).
- [18] 张刚,石玓,黄健康,等. 基于激光点阵的 TIG 焊熔池自由表面三维形貌测量方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 10-16.  
ZHANG G, SHI Y, HUANG J K, et al. Three-dimensional morphology measurement method of free surface of TIG welding pool based on laser lattice[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24):10-16(in Chinese).
- [19] 陈和,杨志浩,郭磐,等. 激光光斑中心高精度定位算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(2):181-185.  
CHEN H, YANG Z H, GUO P, et al. Research on high-precision location algorithm of laser spot center[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(2):181-185(in Chinese).
- [20] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] ZHU J, XU Z J, FU D L, et al. Laser spot center detection and comparison test[J]. Photonic Sensors, 2019, 9(1): 49-52.

#### 本文引文格式:

何俊杰,赵季康,王天琪,等. 基于点阵结构光的三维曲面测量技术[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(5): 78-83.  
HE J J, ZHAO J K, WANG T Q, et al. 3D curved surface measurement technology based on lattice structured light [J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 78-83(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)

(上接第 77 页)

- Engineering, 2022, 49(6): 210411(in Chinese).
- [23] 李鸿强,孙杰,张诚,等. 基于 AWG 的多通道光纤光栅传感解调系统[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(2): 65-71.  
LI H Q, SUN J, ZHANG C, et al. Multi-channel FBG sensor demodulation system based on arrayed waveguide grating (AWG)[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2016, 35(2): 65-71(in Chinese).
- [24] GLOGE D. Weakly guiding fibers[J]. Applied Optics, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [25] 赵荣宇,崔建功,余亚鑫,等. 面向倏逝波传感的光纤谐振腔设计与封装研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 21-24.  
ZHAO R Y, CUI J G, YU Y X, et al. Design and packaging of optical fiber resonators for evanescent wave sensing[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6): 21-24(in Chinese).
- 本文引文格式:  
石嘉,周鹏,郭翠娟,等. 基于磁流体包覆 SNCS 结构的光纤磁场传感系统设计[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(5): 72-77, 83.  
SHI J, ZHOU P, GUO C J, et al. Design of fiber optic magnetic field sensing system based on magnetic fluid-encapsulated SNCS structure [J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 72-77, 83(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)