

基于随机 Hough 变换的圆心三维坐标提取研究

许海英^{1*}, 宋伟鹏², 邓启志³, 万敏², 鲍海龙²

¹西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500;

²西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500;

³中国石油西南油气田公司川西北气矿, 四川 绵阳 621700

摘要 针对圆形目标的二维图像无法直接获取其中心三维坐标的问题, 提出了一种基于随机 Hough 变换的圆心三维坐标提取的方法。随机 Hough 变换方法可对采集到的圆形目标图像快速地进行圆形中心特征点的检测定位, 并根据双目视觉算法将获取到的特征点二维坐标进行立体匹配, 最终得到圆形目标中心的三维坐标信息。所提方法主要用于石油钻井领域中智能化接单根作业的钻杆定位工作, 针对钻杆接头图像定位的实验结果表明: 相比于传统 Hough 变换方法, 随机 Hough 变换方法检测的计算时间大大缩短, 可以显著提高特征点检测效率; 同时结合双目视觉算法能够准确提取圆形目标中心的三维坐标, 且精度高、稳定性好。

关键词 图像处理; 随机 Hough 变换; 圆检测; 双目视觉

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0810017

Three-Dimensional Coordinate Extraction of Circular Center Based on Random Hough Transform

Xu Haiying^{1*}, Song Weipeng², Deng Qizhi³, Wan Min², Bao Hailong²

¹School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

²School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

³Northwest Sichuan Gas Field, Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Mianyang, Sichuan 621700, China

Abstract A three-dimensional coordinate extraction method for the circle center, based on the random Hough transform, is proposed, aiming at the problem that the central three-dimensional coordinates of the circular target cannot be obtained directly from the two-dimensional image. The random Hough transform method can quickly detect and locate the feature points of the collected circular target image's circular center. Further, according to the binocular vision algorithm, the two-dimensional coordinates of the obtained feature points are stereo matched, and finally the three-dimensional coordinate information of the center of the circular target is obtained. The proposed method is mainly used in the field of oil drilling for an intelligent single drill pipe positioning joint operation. The experimental results for drill pipe joint image positioning show that, when compared with the traditional Hough transform method, the calculation time of the random Hough transform method is greatly reduced and the efficiency of feature point detection can be significantly improved. Simultaneously, when combined with a binocular vision algorithm, it can accurately extract the three-dimensional coordinates of the center of the circular target with high precision and good stability.

Key words image processing; random Hough transform; circle detection; binocular vision

1 引言

随着全球工业生产技术的不断提升, 石油工业

领域也在积极引入自动化、智能化技术与装备^[1]。目前石油钻井作业方面仍需要大量工人配合工作, 其中油田钻井中需要进行钻杆接单根操作, 而这一

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-04-18; 录用日期: 2021-05-12

通信作者: *82966339@qq.com

过程需要对钻杆接头的螺纹手工涂刷丝扣油。在当今工业生产大量使用工业机器人的背景下,完全可以将涂刷丝扣油的工作交给定制化的工业机器人操作,而工业机器人涂刷丝扣油的过程中,准确定位钻杆接头的空间位置就显得尤为重要。

如今许多研究者将图像处理技术融合到工业机器人中,其中基于视觉的目标识别定位技术^[2]逐渐成为研究重点。圆形目标的检测与定位是研究热点之一,经过数十年的发展,已经涌现出了多种检测方法,其中基于 Hough 变换的检测方法是应用较为广泛的方法之一。Hough 变换最早是 Hough^[3]在他提交的一份专利中提出的,具有抗噪声干扰及对局部缺损不敏感的特性^[4-5]。然而传统 Hough 变换算法数据量大、计算耗时长,因而很少被实际应用。很多研究者对传统 Hough 变换进行了深入研究,例如对 Hough 圆检测算法进行改进提高精度^[6]、将随机 Hough 变换(RHT)与拟合亚像素圆检测算法结合提高抗干扰性^[7]、改进 Hough 变换算法适应不规则圆检测^[8]及将 Hough 变换圆检测与边缘模板匹配提高检测率^[9]。

仅依靠对二维图像的 Hough 变换并不能获取到圆形目标的精确三维中心坐标,还要利用双目视觉算法进行三维信息的获取。双目视觉最早是由 Roberts^[10]提出的,后经 Marr^[11-12]拓展并创建了一整套较为完备的视觉处理框架。之后,许多研究者不断改进或提出新的双目视觉理论和算法,如适用于多种场景的基于相位的双目视觉传感器标定方法^[13]、利用双目视觉相位匹配的视差孔洞数据插补方法补全遮挡区域信息^[14]、使用双目视觉的测量系统对零件进行测量^[15]及将双目视觉与合作靶标相结合的高效曲面物体位姿估计方法^[16]。在工程应用中,美国国家航空航天局“机遇号”火星探测车和我国首辆月球探测器“玉兔号”^[17-18]均搭载了双目视觉技术,实现了各种测量任务的精确测量。

同时,常规圆形目标三维参数的检测主要通过三维激光成像^[19]或者双目视觉^[20]等技术重构出图像全部三维信息后再拟合出图像中的圆形目标,但这些方法成本较高、需要处理的数据量较大。本文提出了一种基于随机 Hough 变换的圆心三维坐标提取的方法。在圆检测前对图像数据进行简化处理,采用图像预处理将图像中大量背景区域去除,不再需要对所有的像素数据进行计算,采用随机 Hough 变换进行圆形目标的检测;同时不再对采集到的左、右两张图像中对应的每一个像素进行立体匹配,而是仅对提取到的圆心二维坐标进行立体匹配和三维重构,进一步降低了计算时间,提升了计算效率,同时也得到了较高的精度。

2 图像预处理

为了降低 Hough 变换时的计算量,所提方法对图像进行针对性的预处理,处理流程如图 1 所示。



图 1 图像预处理流程

Fig. 1 Image preprocessing process

对采集到的原始图像进行灰度化,可以将 RGB 图像转换为灰度图像,只保留了像素的亮度信息,减小了每个像素点计算量;此外,由于真实场景中各种环境的干扰,图片会存在噪声,对灰度化后的图像进行去噪处理及阈值分割,从而提取出图像感兴趣的区域;最后对分割后的图像进行边缘检测,可以将图像中的非边缘信息去除并保留图像中含有圆形目标的边缘信息。

预处理可去除图像中大部分的无用信息,使图像的像素数据量大大减小,提高后续图像处理的计算效率。预处理后的图像如图 2 所示。

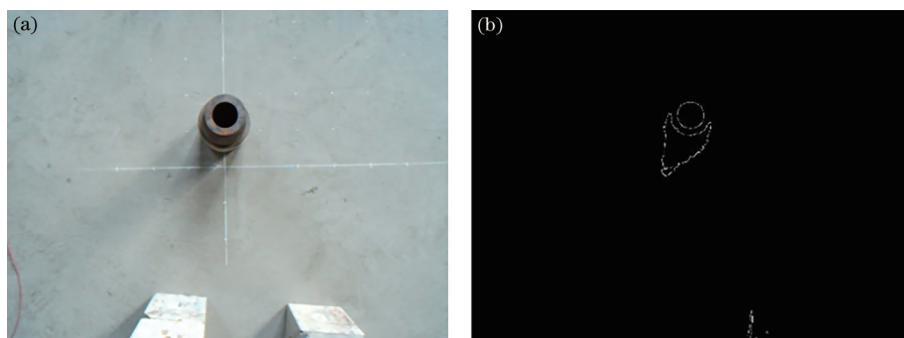


图 2 预处理的图像效果。(a)原图像;(b)预处理后图像

Fig. 2 Image effect of preprocessing. (a) Original image; (b) preprocessed image

3 图像圆形目标的检测与二维参数获取

3.1 Hough 变换圆检测基本原理

Hough 的基本原理是将图像空间转换到参数空间,使变换后的结果更容易识别和检测。假设圆心坐标为 (a, b) , 半径为 r 的圆的一般方程为

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2. \quad (1)$$

对应于图像空间,参数空间中以 (x, y) 为圆心坐标,半径为 r 的圆的方程为

$$(a - x)^2 + (b - y)^2 = r^2. \quad (2)$$

(2) 式将 x - y 平面上的圆转换为参数空间 (a, b, r) 中的一个三维锥面,即图像空间的半径确定的圆,圆周上的所有像素点集在参数空间中对应于 r 相同、 a, b 不同的一系列圆锥的集合,则图像空间中的同一个圆周上的像素点对应于参数空间中的三维锥面必定交于一点,如图 3 所示。

为便于累计投票计算,基本 Hough 变换需要对参数空间离散化,通常将(1)式的圆方程改写为极

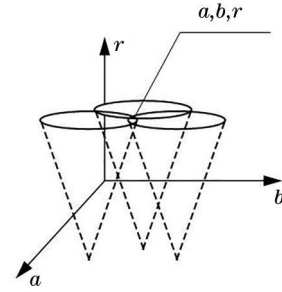


图 3 Hough 圆变换累加参数空间

Fig. 3 Hough circle transform cumulative parameter space

坐标的形式。

$$\begin{cases} a = x - r \cdot \cos \theta \\ b = y - r \cdot \sin \theta \end{cases}, \theta \in [0, 2\pi). \quad (3)$$

针对图像空间的圆形进行检测时,首先根据像素点的梯度信息进行边缘检测,将参数按照给定的量化步长遍历其取值范围,找出边缘上的像素点距离为 r 的所有点集 $\{(a, b)\}$,在满足一定误差条件下在三维累积器数组 $A(a, b, r)$ 中进行投票,该数组的最大值即为所求的圆心坐标。图 4 即为某一图片中 Hough 圆检测三维累加器参数空间。

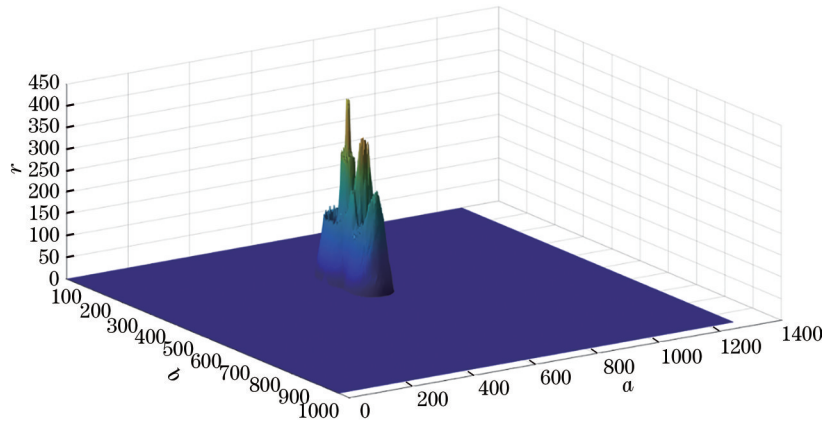


图 4 三维累加参数空间

Fig. 4 Three-dimensional cumulative parameter space

3.2 随机 Hough 变换圆形目标检测

因为传统的 Hough 变换需要对半径 r 和角度 θ 在设定的范围内进行遍历,并对计算结果进行累加,所以整个 Hough 变换的运算时间及运算所需要的内存均较大,需要尽可能减少 Hough 变换时参与的像素点个数及参与累加的数组空间维数以提高 Hough 变换的计算效率。随机 Hough 变换^[21]由于可以在图像中随机选 3 个边缘像素点,并将该点映射到累加参数空间中,降低了累加次数,减小了所使用的内存空间,解决了传统 Hough 变换需要遍历图像中所有边缘点进行大量计算的问题,使计算效率

大大提升。

进行随机 Hough 变换时,首先需要设置所检测的图像中随机选取边缘像素点循环累加次数最大值;其次在图像边缘像素点随机选取过程中,需要判定选取的 3 个点是否共线,如果不共线则根据圆的参数方程计算出对应圆的各项参数,即 (a, b, r) ;然后将其他边缘像素点到圆心 (a, b) 的距离与半径 r 进行对比,如果在一定范围内则认为这一像素点为圆上的点,并将该点位置进行保存,对应累加器空间加 1,当累加器的值超过预设值后则认为检测到了图像中的圆。令 N 表示图像中边缘像素点的

集合, C 表示对应圆的累加器参数空间集合, i 为随机选取像素点的循环次数, i_{\max} 为随机选取像素点的循环次数最大值, T 为累加器阈值。随机 Hough 变换的步骤如图 5 所示。

1) 构造边缘像素点集合 N , 并将圆的累加器参数空间集合 C 初始化为空 (NULL)。

2) 在边缘像素点集合 N 中随机选取 3 个像素点, 如果不共线则进行下一步, 共线则重新随机选取 3 个像素点。

3) 根据随机选取的像素点计算对应圆的各项参数 $p_{x,y,r}$ 。

4) 若圆的参数空间集合 C 中存在其他像素点 p , 当 $p_{x,y,r}$ 与 p 的直线距离 d 小于误差 δ 时, 认为在同一圆上, 将对应累加器加 1; 反之将累加器置为 1。

5) 如果循环次数 i 大于等于 i_{\max} 则停止本次取点循环, 反之继续取点。

6) 当某个圆的累加器参数空间值大于 T 时, 则圆形目标检测完成, 输出圆的各项参数 uvr ; 若图像循环结束累加器未超过 T , 则输出为空。

传统 Hough 变换方法与随机 Hough 变换方法检测图像效果对比如图 6 所示。从图中可以看出, 两种方法均能正确检测圆形目标。

表 1 为两种方法获取到的圆形目标参数, u 、 v 、 r 分别表示检测到的圆形目标的圆心横、纵坐标和圆

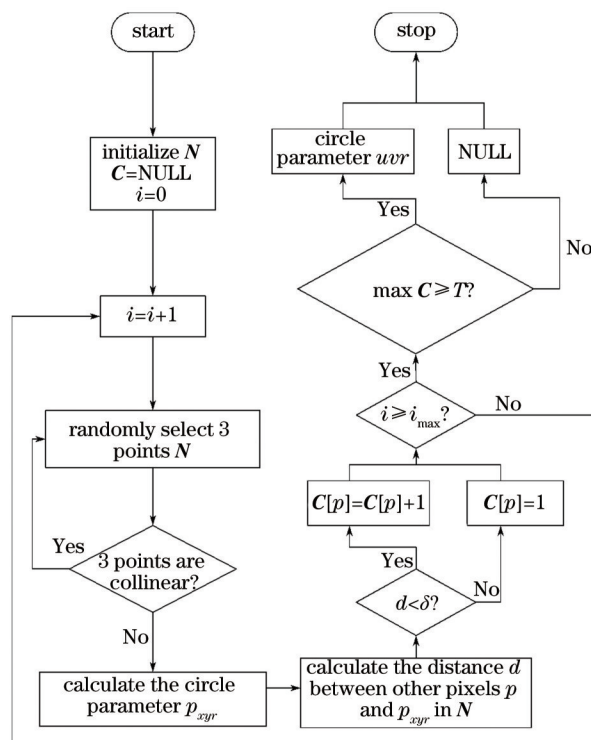


图 5 随机 Hough 变换圆形目标检测流程

Fig. 5 Circular object detection process of random Hough transform

的半径。从表中可以看出, 两种方法检测得到的目标参数基本一致。



图 6 两种 Hough 变换方法检测到的圆形目标。(a) 原始图像; (b) 传统 Hough 变换圆检测; (c) 随机 Hough 变换圆检测

Fig. 6 Circular targets detected by two Hough transform methods. (a) Original image; (b) circle detection by traditional Hough transform; (c) circle detection of random Hough transform

表 1 两种方法获取到的圆形目标参数对比

Table 1 Comparison of parameters of circular object parameters obtained by two methods

Parameter	Traditional Hough transform	Random Hough transform
u	633	634
v	304	304
r	37	37

图 7 为两种方法对双目摄像机采集到的 11 张含有圆形目标的图像进行圆形目标检测所花费的计算时间柱状图。从图中可以看出, 传统 Hough 变换方法的平均计算时间超过 1 s, 完全无法满足实际高效率检测的需求, 而随机 Hough 变换方法检测的平均计算时间不超过 0.2 s, 相比传统方法极大缩短, 可以显著提高计算效率。

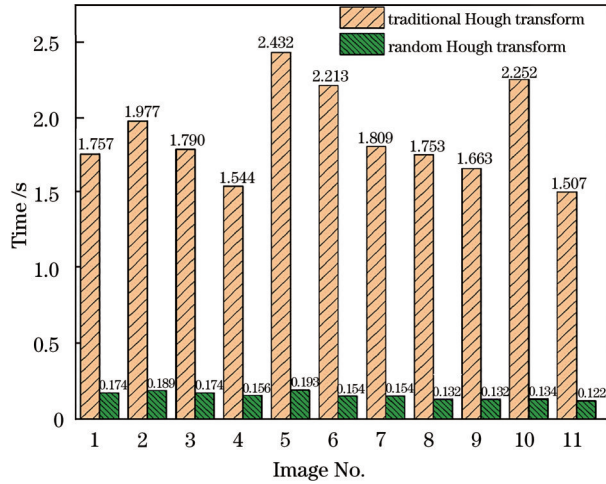


图 7 两种 Hough 变换方法检测圆形目标的计算时间
Fig. 7 Calculation time of two Hough transform methods for detecting circular object

4 双目视觉圆形目标参数重构原理

双目视觉技术模拟人眼视觉系统,依据计算机视觉相关的理论和技术,利用双目摄像头采集同一场景不同位置的图像,对场景进行三维重建。图 8 为双目成像原理图。

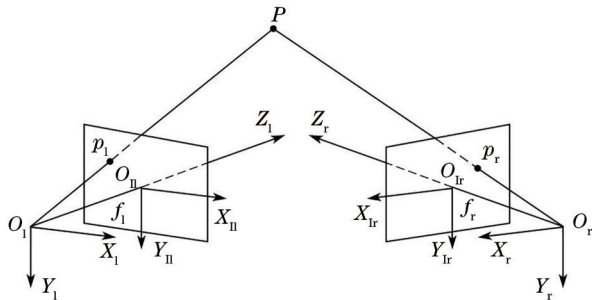


图 8 双目成像原理图
Fig. 8 Schematic of binocular imaging

左侧的摄像机安装在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的原点处且无任何旋转,左摄像机的坐标系记为 $O_l-X_lY_lZ_l$,左摄像机对应的图像坐标为 $O_l-X_lY_lZ_l$, f_l 为其焦距;右摄像机的坐标系记为 $O_r-X_rY_rZ_r$,其图像坐标为 $O_r-X_rY_rZ_r$, f_r 为其焦距。

因为一般双目视觉系统模型参数较多、计算较为复杂,所以在分析双目视觉系统模型时通常采用平行双目视觉系统模型,如图 9 所示。平行双目视觉系统模型的左、右两个摄像机镜头参数相同,且安装的位置能够保证两个摄像机的光轴平行,摄像机的成像平面位于同一平面,二者的光轴平行且与基线垂直。

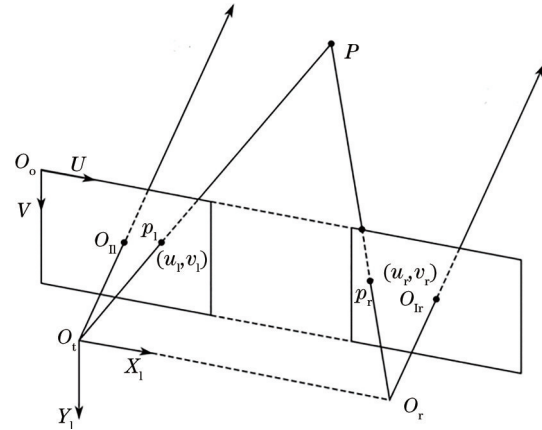


图 9 平行双目视觉成像模型
Fig. 9 Imaging model of parallel binocular vision

根据以上原理,双目视觉系统的基本步骤如下。

1) 摄像机标定。摄像机模型决定了空间物体表面点的几何位置和其对应投影点在图像上的位置关系,用来描述该模型的参数需要通过实验和计算来获得,这个过程称为摄像机标定。摄像机标定是联系二维图像和三维真实场景的桥梁,具有十分重要的意义。本实验组采用张正友标定法,该方法具有成本低、使用方便、适用性强等优点,是介于自标定与传统标定之间的一种新方法。

2) 立体图像校正。图像校正是进行立体匹配前的一个重要步骤。在获得两个摄像机的极线几何关系后,可以利用极线约束来寻找匹配点,从而加速匹配并提高稳定性。但在真实世界中,由于组装、成像等诸多原因,摄像机不能做到平行对准,这使得匹配搜索仍然要花费相当一部分时间。而图像校正可以将极线对校正成平行方向,两幅图像只存在水平视差,对应点的搜索只需要在同一扫描线上平移进行,极大地减少了搜索的时间。

3) 立体匹配。经过摄像机标定获取了摄像机的内外参数后,就可以通过两个不同摄像机视图中的匹配点之间的三角测量视差值来求取深度信息。而立体匹配的作用正是求取视差,即寻找同一景物在不同图像中的相匹配的投影点,并计算它们之间的关系。传统立体匹配算法针对左右两幅图像的全局或者部分区域进行匹配,数据量庞大,因此本实验组采用圆检测的方法进行立体匹配,该方法只需要检测两幅图像中的同一目标点位置,匹配结果只有两幅图像中的同一目标点,数据量极小,有利于后续三维坐标重建。

4) 三维重建。在标定和校正后,左、右两个摄像机在 X 轴方向上相差一个基线距离 B , 假定空间点 P 在左摄像机坐标下的坐标为 (x_l, y_l, z_l) , 在右摄像机坐标系下的坐标为 $(x_r - B, y_r, z_r)$ 。由成像的几何关系有

$$\begin{cases} u_l - u_{ol} = f_{xl} \frac{x_l}{z_l} \\ v_l - v_{ol} = f_{yl} \frac{y_l}{z_l} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_r - u_{or} = f_{xr} \frac{x_l - B}{z_r} \\ v_r - v_{or} = f_{yr} \frac{y_l}{z_r} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: (u_l, v_l) 和 (u_r, v_r) 分别为点 P 在左、右图像中的图像像素坐标, 经过立体校正的对应点纵坐标相同, 即 $v_l = v_r$, 两横坐标之间存在差异; (f_{xl}, f_{yl}) 和 (f_{xr}, f_{yr}) 为左、右摄像机在 u 轴和 v 轴方向上的焦距; (u_{ol}, v_{ol}) 和 (u_{or}, v_{or}) 分别为左、右摄像机的主点。联立(4)式和(5)式即可得到以左摄像机坐标系为基准的 P 点坐标。

$$\begin{cases} X_l = \frac{B(u_l - u_{ol})}{u_l - u_r} \\ Y_l = \frac{Bf_{xl}(v_l - v_{ol})}{f_{yl}(u_l - u_r)} \\ Z_l = \frac{Bf_{xl}}{u_l - u_r} \end{cases} \quad (6)$$

为了提高计算精度, 同理, 以右摄像机坐标系为基准的 P 点坐标为

$$\begin{cases} X_r = \frac{B(u_r - u_{or})}{u_l - u_r} \\ Y_r = \frac{Bf_{xr}(v_l - v_{or})}{f_{yr}(u_l - u_r)} \\ Z_r = \frac{Bf_{xr}}{u_l - u_r} \end{cases} \quad (7)$$

将得到的 P 点相对于右侧摄像机的空间位置坐标 (X_r, Y_r, Z_r) 平移到左侧摄像机的坐标系上, 取 (X_r, Y_r, Z_r) 和 $(X_r + B, Y_r, Z_r)$ 两组数据的平均值作为目标特征点在左侧摄像机坐标系下的空间位置 (X_L, Y_L, Z_L) 。

$$\begin{cases} X_L = \frac{X_l + (X_r + B)}{2} \\ Y_L = \frac{Y_l + Y_r}{2} \\ Z_L = \frac{Z_l + Z_r}{2} \end{cases} \quad (8)$$

5 实验结果与分析

所采用的双目摄像机参数如表 2 所示。通过棋盘格对双目相机进行标定获取到相机的内、外参数后, 就可得到左右摄像机与标定板之间的位置关系, 如图 10 所示。

表 2 双目摄像机参数
Table 2 Parameters of binocular camera

Parameter	Value
Camera resolution	1280×960
Sensor size /inch	1/3
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	3.75×3.75
Frame rate /($\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$)	60

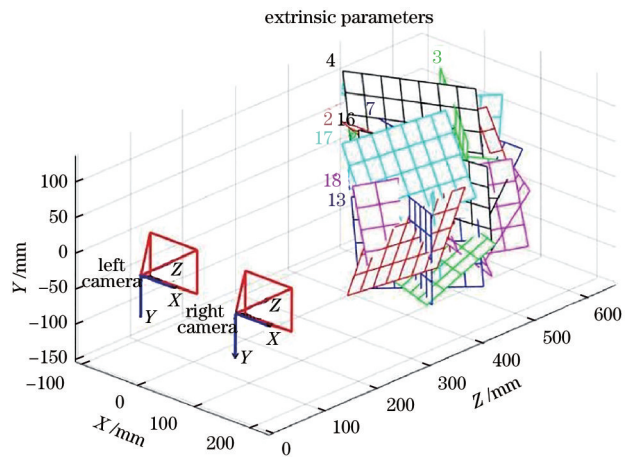


图 10 双目摄像机及标定板之间的位置关系
Fig. 10 Position relationship between binocular camera and calibration plate

标定后得到的相机内、外参数可表示为以下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} 918.1252 & 0 & 617.7788 \\ 0 & 920.3911 & 457.5862 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 923.2624 & 0 & 604.3009 \\ 0 & 927.4366 & 468.7513 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0033 & -0.0064 \\ 0.0034 & 0.9999 & 0.0107 \\ 0.0063 & -0.0107 & 0.9999 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -171.5897 \\ 0.4901 \\ 1.9176 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: \mathbf{M}_l 和 \mathbf{M}_r 分别为左右摄像矩阵; \mathbf{R} 是旋转向量经过 Rodrigues 变换后的矩阵形式; \mathbf{T} 为平移向量。

由于本研究应用于钻杆接头图像定位,且研究项目要求双目摄像机在钻杆接头正上方或近似正上方 50~80 cm 处进行俯拍,钻杆接头内径在 10~20 cm 之间。因此本实验组在以上研究背景要求的范围内随机放置不同直径的钻杆接头,并进行图片的采集。考虑到摄像机实际拍摄时会出现光照不足的情况,所拍摄的图片在某些情况下画面亮度可能较低,本实验组将采集到的正常光照下的图片亮度降低至原图像亮度的 25% 以模拟在光照不足的

情况下采集到的图像,后续图像的处理均包括正常亮度和低亮度图像以测试算法的稳定性。图 11、图 12 分别为双目摄像机采集到的 11 张正常亮度图像和模拟光照不足情况下的图像。因为图像是在实验室条件下采集的,外界干扰较小,而真实场景中各种干扰,所以为了更加贴近真实情况,本实验组在采集到的图像中加入常见的高斯白噪声和椒盐噪声并进行相关测试。



图 11 正常亮度图像

Fig. 11 Images of normal brightness



图 12 模拟光照不足图像

Fig. 12 Simulated images with insufficient illumination

将采集到的 11 组不同目标位置的图像输入程序处理,最终得到的计算数据与测量值如表 3 所示,表 3 中的数据是以左摄像机为原点得到的。

根据表 3 可以计算出图像圆形目标中心的坐标计算值与实际坐标之间的误差,图 13~15 分别为 4 种图像中计算的坐标点在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上与实际坐标之间的误差折线分布图。从图中可以看出:计算出的中心坐标在 X 轴方向上的误差在 $[-0.45 \text{ cm}, 0.49 \text{ cm}]$ 范围内;Y 轴方向上的误差范围为在 $[-0.45 \text{ cm}, 0.48 \text{ cm}]$ 范围内;Z 轴方向上的误差范围在 $[-0.29 \text{ cm}, 0.86 \text{ cm}]$ 范围内;其中 X 轴方向上的最大误差出现在序号 4 的带噪声模拟光照不足的图像定位数据中,为 0.49 cm;Y 轴方向上

的最大误差出现在序号 8 的带噪声正常亮度的图像定位数据中,为 0.48 cm;Z 轴方向上的最大误差出现在序号 11 的带噪声正常亮度的图像定位数据中,为 0.86 cm。

同时可以计算出目标点与原点之间的距离 D ,

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (10)$$

即可得到各组图像中实际目标点距离与系统计算距离对比情况,如表 4 所示。

由表 3 可得,正常亮度图像、正常亮度带噪声图像、模拟光照不足图像及模拟光照不足且带噪声图像 (X, Y, Z) 各轴向的均方根误差 (RMSE) 分别为 (0.2433, 0.2271, 0.2541)、(0.2588, 0.2698, 0.2729)、(0.2289, 0.2238, 0.3213)、(0.2777,

表 3 计算结果与实际结果比较
Table 3 Comparison of calculated results and actual results

No.	Actual coordinates /cm	Calculated coordinates (normal brightness) /cm	Calculated coordinates (normal brightness image with noise) /cm	Calculated coordinates (insufficient brightness) /cm	Calculated coordinates (insufficient brightness image with noise) /cm
	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z
1	0, -11.3, 62.7	0.22, -10.97, 63.08	0.15, -10.86, 62.83	0.15, -11, 63.33	0.22, -11.04, 63.08
2	20.8, -21.5, 62.7	20.72, -21.46, 63.08	20.64, -21.44, 62.83	20.64, -21.4, 62.83	20.64, -21.37, 62.83
3	-10.4, -21.5, 69.2	-10.62, -21.33, 68.91	-10.87, -21.45, 69.53	-10.7, -21.3, 68.91	-10.82, -21.43, 69.22
4	20.6, -1.4, 69.2	21.07, -1.36, 69.22	20.98, -1.36, 68.91	21.05, -1.36, 68.91	21.09, -1.75, 69.53
5	0, -11.2, 47	0.32, -11.32, 46.84	0.27, -11.31, 46.98	0.16, -11.3, 46.98	0.22, -11.32, 47.26
6	21.2, -1.4, 47	21.38, -1.66, 47.41	21.38, -1.71, 47.41	21.32, -1.65, 47.26	21.41, -1.67, 47.69
7	0, 9, 1, 47	-0.25, 8.87, 47.12	-0.3, 8.92, 47.12	-0.25, 8.89, 46.98	-0.35, 8.97, 47.12
8	10, -11.3, 47	10.01, -10.98, 47.12	9.96, -10.82, 47.12	9.99, -11, 47.26	9.98, -10.84, 46.98
9	19.8, 1.5, 53.1	19.64, 1.34, 53.39	19.65, 1.35, 53.57	19.71, 1.41, 53.57	19.72, 1.29, 53.76
10	21, 1.4, 37.8	21.28, 1, 37.97	21.19, 0.95, 37.88	21.24, 0.96, 37.97	21.24, 0.96, 37.97
11	20, 1.5, 83.7	20.16, 1.56, 83.66	20.26, 1.56, 84.11	20.26, 1.47, 84.11	20.28, 1.39, 84.56

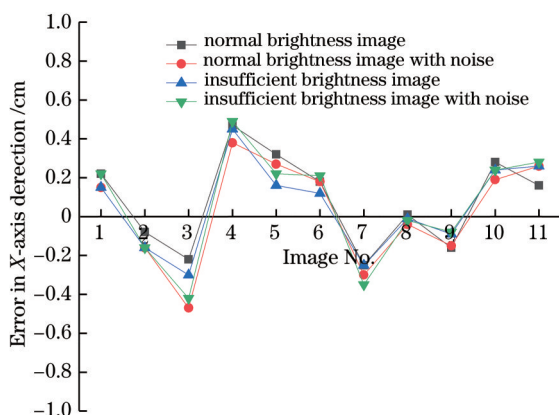


图 13 圆形目标中心坐标点 X 轴向误差分布

Fig. 13 X-axis error distribution of central coordinate points of circular object

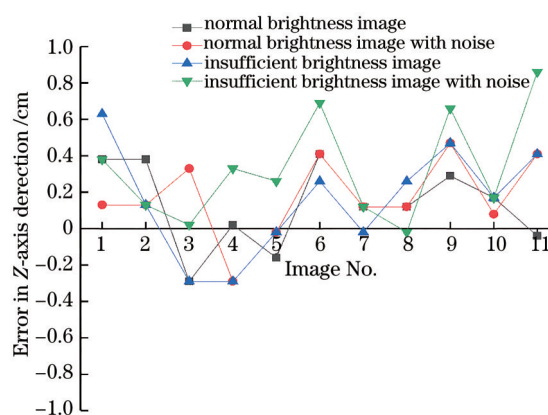


图 15 圆形目标中心坐标点 Z 轴向误差分布

Fig. 15 Z-axis error distribution of central coordinate points of circular object

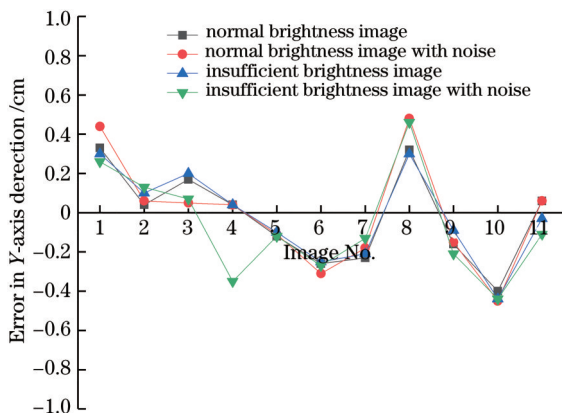


图 14 圆形目标中心坐标点 Y 轴向误差分布

Fig. 14 Y-axis error distribution of central coordinate points of circular object

0.2659, 0.4299); 同时由表 4 可以计算出, 目标点位置与原点之间距离的相对误差平均值为 0.42%, 最大相对误差为 1.4%; 目标点实际位置与计算位置之间误差距离平均值为 0.46 cm, 最大值为 0.91 cm。

通过分析可知, 光照不足且带有噪声的图像对定位精度有影响, 且对 Z 轴方向的精度影响较为明显, 但是误差均未超过 1 cm, 满足研究项目对精度的要求。

同时, 图像定位的误差还受双目摄像机本身分辨率的限制及随机 Hough 变换随机特性的影响: 设备较低的分辨率会使拍摄出的目标图像丧失一部分细节特征, 使得边缘检测精确度下降; 同时因为随机 Hough 变换每次是随机选 3 个边缘像素点进行

表 4 图像圆形目标中心实际距离与计算距离对比

Table 4 Comparison between actual distance and calculated distance of circular object center

No.	Actual distance / cm	Normal brightness image		Normal brightness image with noise		Insufficient brightness image		Insufficient brightness image with noise	
		Calculated distance /cm	Relative error /%	Calculated distance /cm	Relative error /%	Calculated distance /cm	Relative error /%	Calculated distance /cm	Relative error /%
		1	63.71	64.03	0.50	63.76	0.08	64.28	0.89
2	69.47	69.78	0.45	69.52	0.07	69.51	0.06	69.50	0.04
3	73.21	72.91	0.41	73.57	0.49	72.92	0.40	73.26	0.07
4	72.21	72.37	0.22	72.05	0.22%	72.07	0.19	72.68	0.65
5	48.32	48.19	0.27	48.31	0.02	48.33	0.02	48.60	0.58
6	51.58	52.03	0.87	52.04	0.89	51.87	0.56	52.30	1.40
7	47.87	47.95	0.17	47.96	0.19	47.81	0.13	47.97	0.21
8	49.36	49.41	0.10	49.35	0.02	49.54	0.36	49.24	0.24
9	56.69	56.90	0.37	57.08	0.69	57.10	0.72	57.28	1.04
10	43.26	43.538	0.64	43.41	0.35	43.52	0.60	43.52	0.60
11	86.07	86.06	0.01	86.53	0.53	86.53	0.53	86.97	1.05

检测定位的,所以同一组图像每次检测的数据会出现波动。

6 结 论

提出了一种基于随机 Hough 变换的圆形目标三维中心提取的方法,该方法通过随机 Hough 变换对二维图像中的圆形目标中心进行定位,获取左、右两张图像中同一圆形目标的二维坐标,然后利用平行双目视觉算法恢复出圆形目标的三维坐标。为了解决传统 Hough 变换计算量庞大的问题,采用针对性的图像预处理,使图像中参与运算的像素点数量大幅降低,同时随机 Hough 变换加快了计算速度;此外所采用的双目视觉算法在立体匹配时只需要计算每张图像的目标点,计算量非常小,提高了三维重建的计算速度。实验结果表明,所提方法整体目标识别率高、计算速度快,三维重建后的坐标值与实际测量值接近,距离误差较小,为圆形目标识别与立体定位应用提供了保障。

参 考 文 献

[1] Kuang L C, Liu H, Ren Y L, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 1-11.
匡立春, 刘合, 任义丽, 等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 1-11.

[2] Peng H H, Liu F F, Dai Y Y, et al. Application

research of industrial robot sorting system based on mobile vision[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(20): 26-30.

彭辉辉, 刘飞飞, 代云勇, 等. 基于移动视觉的工业机器人分拣系统应用研究[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(20): 26-30.

[3] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns: US3069654[P]. 1962-12-18.

[4] Tan D Y, Chen L G, Jiang C, et al. A circular target feature detection framework based on DCNN for industrial applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(5): 3303-3313.

[5] Gong X, Zhang N. Improvement of circle detection algorithm based on Hough transform[J]. *Information Technology*, 2020, 44(6): 89-93, 98.
龚昕, 张楠. 基于 Hough 变换的圆检测算法的改进[J]. *信息技术*, 2020, 44(6): 89-93, 98.

[6] Zou B C, Qiu H D, Lu Y F. Spherical object recognition based on the number of contour edges extracted by fitting and convex hull processing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 2020, 235(5): 1225-1235.

[7] Wang G J. A sub-pixel circle detection algorithm combined with improved RHT and fitting[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(39/40): 29825-29843.

[8] Hou J C, Liu G H, He J Q, et al. Central detection based on improved random Hough transform[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(1): 124-128.
侯建成, 刘国海, 何坚强, 等. 改进随机 Hough 变换

- 的中心检测[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 124-128.
- [9] Duan Z D, Wei L S, Liu X H, et al. Bearing defect detection and location based on Hough transform circle detection and edge template matching[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2020, 35(4): 60-68.
段志达, 魏利胜, 刘小琿, 等. 基于 Hough 变换圆检测和边缘模板匹配的轴承缺陷检测与定位[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(4): 60-68.
- [10] Roberts L G. Machine perception of three-dimensional solids[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [11] Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information[M]. Massachusetts: The MIT Press, 1983: 107-110.
- [12] Marr D. Visual computational theory[M]. Yao G Z, Transl. Beijing: Science Press, 1998: 113-164.
Marr D. 视觉计算理论[M]. 姚国正, 译. 北京: 科学出版社, 1998: 113-164.
- [13] Shao M W, Wang P, Wang Y J. Phase-based calibration method for a binocular vision sensor[J]. IEEE Access, 2021, 9: 44354-44362.
- [14] Shu A, Pei H D, Ding L, et al. Binocular visual position and attitude measurement method for a spatial non-cooperative target[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712003.
束安, 裴浩东, 丁雷, 等. 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712003.
- [15] Xie Z X, Wang X D, Gong H L. Round-hole profile measurement of thin-walled parts based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1204004.
解则晓, 王晓东, 宫韩磊. 基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓测量[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1204004.
- [16] Liu Y Z, Zhang J R, Lin S. Pose estimation of curved objects based on binocular vision and vectors of the tangent plane[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041506.
刘玉珍, 张嘉蓉, 林森. 基于双目视觉与切面向量的曲面物体位姿估计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041506.
- [17] Bell J F III, Squyres S W, Herkenhoff K E, et al. Mars exploration rover Athena panoramic camera (Pancam) investigation[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2003, 108(E12): 433-439.
- [18] Li J. Research on vision-based localization technology of the lunar rover[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015: 22-24.
李晶. 月面探测中视觉定位技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 22-24.
- [19] Ruan J J. Design of positioning and navigation system for picking robot power patrol line based on airborne three-dimensional laser imaging[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5): 191-195.
阮娟娟. 采摘机器人定位导航系统设计—基于机载三维激光成像电力巡线[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 191-195.
- [20] Wang H, Wang X F, Kang Y J, et al. Research on workpiece spatial location method based on binocular vision[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2019, 32(6): 1-4.
王翰, 王西峰, 康运江, 等. 基于双目视觉的工件空间定位方法研究[J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32(6): 1-4.
- [21] Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities[J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 57(2): 131-154.