西 南 科 技 大 学

研 究 生 学 位 论 文

**自动对接系统中双目视觉定位技术**

**应用研究**

**年 级 2015级**

**姓 名 王玉玫**

**申请学位级别 硕 士**

**专 业 控制工程**

**学 校 教 师 刘桂华 教授**

**校 外 导 师 武文斌 高级工程师**

Classified　Index: TP391

U.D.C: 004.8

Southwest University

of Science and Technology

Master Degree Thesis

Binocular vision positioning technology in automatic docking system

Applied research

Grade: 2015

Candidate: wang yumei

Academic Degree Applied for: Master

Speciality:Control Science and Engineering

Supervisor: Prof.Liu Guihua

March.1.2018

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得西南科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：　　　　　　　　　日期：

关于论文使用和授权的说明

本人完全了解西南科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签名：　　　　　　　导师签名：　　　　　　日期：

# 摘 要

本文以隔水管在检验检测装置上的对接和基于视觉对空间目标进行定位为背景。在目前的隔水管对接系统中,对接工作主要靠手工操作,这种方式效率低、精度差,劳动强度大,在自动化装配中并不适用。本课题研究了测量隔水管位置和姿态的有关方法，并进行了模拟实验。

针对自动对接系统隔水管的双目视觉定位技术可以分为以下九个部分：双目摄像机标定，图像去噪，ROI提取，图像分割，XLD特征分析，椭圆拟合，特征点匹配，特征点重建，相对位姿估计。为了降低隔水管检测工厂复杂背景的干扰，本课题使用模板匹配技术进行ROI跟踪测量，提出基于HOG特征的改进模板匹配算法，相对于传统模板匹配算法在定位精度上有明显的优势；为兼顾实时性和精确性要求，采用亚像素级特征点提取方法获得隔水管法兰端面特征边缘信息；设计了一种基于边界的椭圆拟合策略，能够快速有效识别出特征边缘信息中的椭圆并进行拟合得到特征点椭圆圆心及长短轴；在使用极限极限约束进行特征点匹配的基础上，提出使用拟合得到的椭圆长轴作为匹配的附加条件，有效减少同一极限上两个特征点之间的误匹配；最后使用SVD分解法对三维重建后的特征点求取隔水管之间的坐标系转换，并用欧拉角描述法对隔水管位姿进行描述。

最后构建了基于双目视觉定位技术的隔水管对接实验仿真系统，系统包含标定模块、检测模块、图像显示模块和数据显示模块。使用 C#编程设计测量软件，实现本文设计的双目视觉定位技术算法。通过模拟隔水管对接过程，进行了隔水管的移动估计量：、和旋转估计量：偏航角（Ψ）、俯仰角（θ）、滚动角（Φ）变化等相关实验，实验结果证明了所设计方法的有效性，具有一定的实际参考价值。

关键词：摄像机标定 模板匹配 特征点匹配 三维重建 目标定位 位姿估计

Abstract

This paper is based on the docking of the riser on the inspection and inspection device and the positioning of the space target based on vision. In the current riser docking system, the docking work mainly depends on manual operation. This method is inefficient, has poor precision, and is labor-intensive, and is not suitable for automated assembly. This topic studies the methods for measuring the position and attitude of the riser and conducts simulation experiments.

The binocular vision positioning technology for the automatic docking system riser can be divided into the following nine parts: binocular camera calibration, image denoising, ROI extraction, image segmentation, XLD feature analysis, ellipse fitting, feature point matching, feature point reconstruction , Relative pose estimation. In order to reduce the interference in the complex background of the riser inspection plant, this subject uses the template matching technology to track and measure the ROI, and proposes an improved template matching algorithm based on the HOG feature. Compared with the traditional template matching algorithm, it has obvious advantages in positioning accuracy; In terms of accuracy and accuracy, sub-pixel feature point extraction method is used to obtain the feature edge information of the flange end face of the riser; an ellipse-fitting strategy based on the boundary is designed to quickly and effectively identify the ellipse in the feature edge information and simulate it. The ellipse center and the major and minor axes of the feature points are obtained; using the limit limit constraint to match the feature points, the elliptic long axis obtained by fitting is used as an additional condition for matching, effectively reducing the distance between two feature points on the same limit. Mismatching; finally use SVD decomposition method to obtain the coordinate transformation between the three-dimensional reconstruction of the feature points between the risers, and use Euler angle description method to describe the pose of the riser.

Finally, the simulation system of the riser docking experiment based on binocular vision positioning technology was built. The system includes calibration module, detection module, image display module and data display module. Use C# programming and design measurement software to implement the binocular vision positioning technology algorithm designed in this paper. Through the simulation of the docking process of the riser, the estimated movement of the riser: ：、 and rotation estimate: yaw angle (Ψ), pitch angle (θ), roll angle (Φ) change, and other related experiments, the experimental results prove The effectiveness of the designed method has a certain practical reference value.

Keywords：Camera calibration；template matching；feature point matching；Three-dimensional reconstruction；target positioning ；pose estimation

# 

# 1 绪论

## 研究背景及意义

本文以隔水管在检验检测装置上的对接作为应用研究背景,本文综述了基于双目视觉的空间物体三维位置和姿态的研究和取得的成果。

隔水管是一种管道，它可以连接钻井平台[1]（或钻井船）和海底井口，隔水管的主要作用是隔离钻井液和海水、引导钻井工具、补偿钻井平台的上升下沉运动、循环钻井液和用于支撑辅助管线等。深水钻井平台中相对脆弱以及非常重要的部分是隔水管，所以说隔水管各项指标的安全性能是否达标对海上作业安全起到非常大的作用。

在深水海域台风[2]等极端天气强度较大和频率较高，台风灾害已经成为影响隔水管安全的载要因素,1983年，JEVA SEA钻井平台在中国南海沉没，该事故导致81人遇难。2005年，Katrina飓风与Rita飓风一共摧毁109个钻井设备[3]，导致损失石油产量1.7%和天然气产量0.9%。中国钻井平台981在2012年时在海上作业时遇到了杜苏芮等数个台风的影响，直接导致隔水管断裂，如图1-1所示，该事件导致海上作业暂停了大约一月，造成了经济上的极大损失。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图1-1 台风对钻井设备的破坏 | |
| Fig.1-1 The typhoon destroyed the drilling rig | |

由于我国南海深水区域台风等极端天气条件发展迅速[4]，以保护井口和钻井设备，为保证石油勘探的安全性和稳定性，除了对隔水管整体结构的强度、密封性和重复装拆性的要求外，对隔水管在出厂时候的抗压力的检验效率也提出了更高的要求。而将待检测隔水管对接到隔水管检验检测装置上仍然是制约隔水管抗压检验效率的一个重要环节，目前我国在隔水管对接方面还处在人工对接状态，这严重影响了隔水管的抗压检验效率，且无法保障石油勘探的进度，因此提高隔水管检验检测效率，使用视觉引导对接帮助改善目前对接过程处于人工对接状态具有重要意义。

## 国内外研究现状

### 自动对接系统的研究现状

自动对接系统是桥梁工程、航天航空、化学工业、船舶制造、机械制造等领域的常见工程。现在工厂中使用的大部分对接系统都采用人工操作来实现对接，利用肉眼观察两个对接面之间有没有平行，可不可以进行精确对接。这种对接方式的精度十分低下，而且需要大量重复的人为调节才能完成对接，并且对操作人员的技能要求相对较高。

经由在对接系统中利用机器视觉技术来指导实现对接进程的自动化来取代传统的人工对接正慢慢发展为一个大的趋势。在一些体积庞大部件的对接中，许多国外文献利用到了机器视觉去人工对接，例如将机器视觉应用于航天器[5-6] 的对接。在中国，也有不少应用与对接系统中的机器视觉例子，比如在混凝土输送过程中的对接，利用机器视觉进行准确的装卸位置定位，加快混凝土的卸载速度，提高工作效率。除此之外，沈子琦[7] 将在喷嘴组配准系统中利用图像处理技术解决喷嘴对接的问题。另外在小器件的对接中的应用也很多，如在硅芯片定位系统的定位系统中实现了一个非常重要的应用[8]，将机器视觉应用于光电器件的自动对接系统中，实现了光纤的自动对接，提高了光纤对接的效率和精度[9]。

上述对接系统中所有的相机都采用单一的相机，并且需要辅助设备，只能用于特定的环境和应用系统并且两个对齐面之间的距离不能直接计算。在自动对接系统进行对接时不能实时的进行误差的调整。为了克服这些缺点，本文研究了隔水管在检验检测装置上的对接过程，利用双目视觉直接计算出隔水管法兰端面上特征点的三维坐标，然后利用特征点对隔水管进行位姿描述，并根据位姿计算运动控制参数，将其输出到移动控制平台调整校准以实现隔水管的精确对接。

### 双目视觉定位技术国内外研究现状

双目视觉定位现目前应用的领域有：微操作系统参数检测、机器人导航系统、虚拟现实场景、三维测量场景，目前，在这一领域，国内外都有广泛的研究[10-12]。

由东京大学开发的模拟机器人动态步行导航系统。该系统利用二维图像分割算法将地面和障碍物分别进行分割。然后将机器人位姿从二维像素坐标系转换到世界坐标系下，然后生成周围环境的地图，然后用地图检测机器人行走方向的同时检测出行走方向上的障碍物。

另外一个基于双目重建由美国开发的火星卫星“探测器”，能够实现在火星上几公里范围内的精确定位和导航 ，很快就会超过几千米。该系统采用图像匹配技术，结合非线性优化和鲁棒似然最大似然估计，获得亚像素的精确视差，不仅能精确地生成“探针”周围环境的景观还具有很高的精度和很远的地形。

在中国，很多专家、学者对该项技术进行了一系列的研究。最明显的是足球机器人导航和三维空间中非接触测量。足球机器人导航[13] 基于一个不动的相机和一个可动的相机组成的双目视觉系统，它可以同时监测不同方位的环境。双目协调技术使足球机器人可以同时监控几个有效目标，在观测到同一目标时，利用数据融合可以减少错误检测。三维空间的非接触式测量为基于双目的投影光栅三维重建[14-15]，利用双目摄像机获得服装设计所需要的特征。该系统已经开发为产品并投入大量的使用当中，该产品可用于测量身高、颈围、胸围、腰围、臀围等，误差在5毫米以内。

## 论文章节安排

本课题研究的问题是在隔水管检验检测装置上加装双目视觉定位系统，对隔水管位姿进行定位位姿检测，并开发应用软件平台。利用双目重建原理，通过双目摄像机分别进行隔水管图像采集，然后对图像进行去噪，使用改进的模板匹配算法基于HOG特征的模板匹配算法对隔水管法兰端面定位，然后通过亚像素阈值分割分割出隔水管法兰端面与水管连接的圆孔，将分割出来的边缘实现椭圆拟合，可以得到椭圆圆心和长短轴数据，利用极限约束与本文附加的约束条件对检测到的椭圆圆心特征点进行特征点匹配并重建，使用重建后的特征点进行隔水管的位姿描述，本课题使用欧拉角的方式对隔水管进行位姿描述，使用SVD分解算法求取隔水管之间的旋转平移矩阵，计算运动控制参数到移动控制平台。基于双目视觉的隔水管定位技术能直接测量运动控制平台的位移估计量tx、ty，旋转估计量θx、θy、θz，可以自动的计算偏移量，帮助实现隔水管对接过程的自动化。本系统具有高的工作效率、可降低人工经费、减少人工劳作强度的特点。

论文主要内容安排如下：

第一章介绍了本课题的应用背景，明确了课题选择依据和课题研究意义，比较研究了国内外状况。

第二章介绍了本课题的一个需要达到的研究目标、对于隔水管法兰端面图像采集的方式和使用双目视觉进行定位的具体算法流程。

第三章讨论了双目相机的标定方法，介绍相机成像系统中几个坐标系之间的相互转换以及镜头畸变模型，最后使用halcon标定板进行了相机标定试验分析和精度测量。

第四章阐述了隔水管图像的特征点提取和匹配，对图像去噪、ROI区域定位、图像分割和椭圆拟合等算法做了比较结合算法的优点和试验验证分析，使用相对最优算法用于本课题中。

第五章对隔水管法兰端面进行目标定位与位姿计算，介绍了本课题使用欧拉角方式对位姿进行描述，使用SVD分解法求隔水管之间的旋转平移矩阵，最后给出运动控制参数的定义。

第六章选择适合的视觉设备，搭建实验平台，设计简单易用的应用操作软件平台，并进行系统验证，对结果进行精度测量分析。

第七章对总结本课题的工作，并对今后本课题的工作提出了展望。

# 2 双目视觉定位技术检测总体方案

自动对接系统中双目视觉定位技术应用研究，以隔水管在检验检测装置上的对接作为应用研究背景，将双目视觉搭建在隔水管检验检测装置上，利用二维特征点提取、三维重建和隔水管位姿描述的方式，对隔水管进行定位检测输出控制参数位移估计量和旋转估计量到移动平台。

## 研究目标

根据注水端法兰端面与隔水管法兰端面机械安装公差要求，隔水管位移估计量tx、ty精度需要达到0.3mm，旋转估计量θx、θy、θz的精度不可以超过0.2度。

## 2.2总体设计方案

系统设计平台如图2-1所示，该系统包括对隔水管法兰端面图像的采集系统、可以使隔水管检验检测装置进行运动控制的运动控制系统以及使用计算机进行视觉算法处理的视觉算法处理系统。运动控制系统由隔水管、注水端、封堵端、底座、导轨以及移动平台组成，其中移动平台的作用是接收计算机处理系统所发出的控制参数位移估计量和旋转估计量并控制注水端和隔水管发生相对应的移动达到调整自身的姿态使其与隔水管法兰端面处于精确对中状态的目的，注水端的作用是通过隔水管的一端注水到隔水管内部用于检测隔水管的抗压能力，封堵端则是用于密封隔水管的另一端防止水的溢出；为了保证隔水管对接的率效，图像采集系统采取无接触数据采集的方式进行图像采集，在注水端和封堵端上方各安装一个工业摄像机用于获取隔水管两端法兰端面图像，并且工业摄像机与隔水管法兰端面的相对拍摄距离固定不变；计算机处理系统对摄像机采集的图片进行二维特征点提取、三维重建和隔水管位姿描述，对隔水管进行定位检测计算控制参数位移估计量和旋转估计量。



A、E-移动平台 B-注水端 C-隔水管 D-封堵端

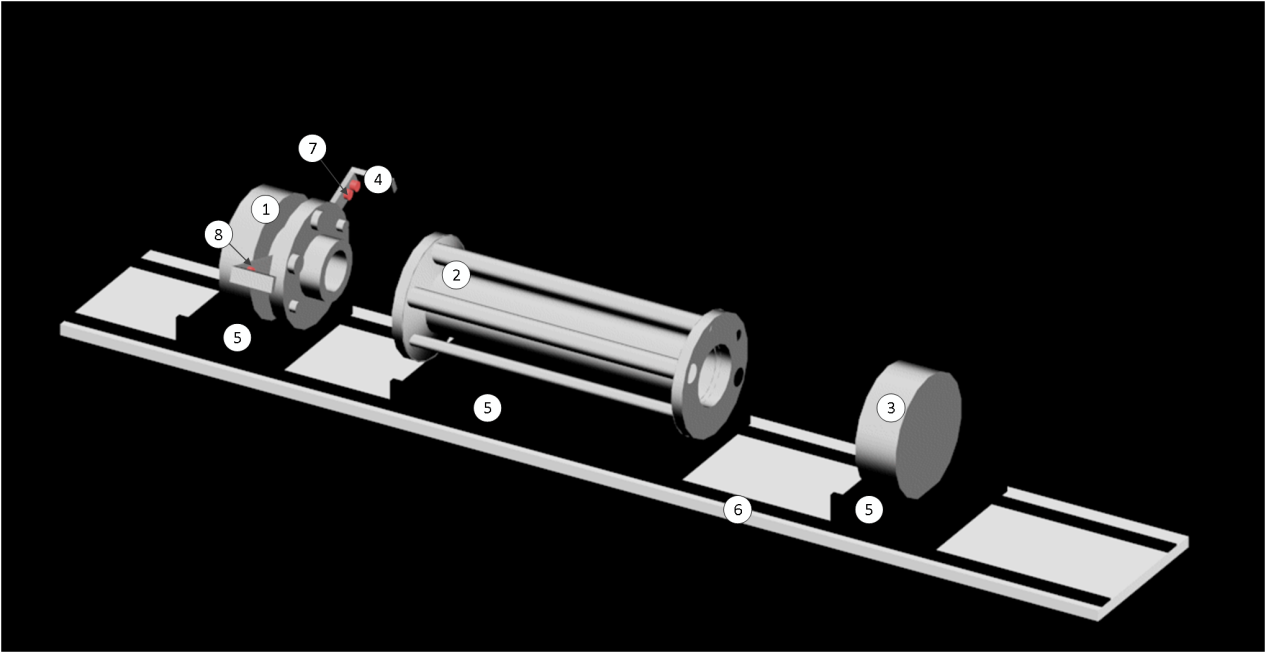
F-底座 G-导轨 H-摄像机 I-计算机

图2-1 系统总体设计

Fig.2-1 Overall system design

### 2.2.1图像采集方式设计

如图2-2所示为使用3DMax2012软件对隔水管对接场景的仿真效果图。使用双目视觉定位技术对隔水管位姿进行检测时，双目摄像机的安装位置不能妨碍隔水管在检验检测装置上的正常安装，因此将双目相机安装在注水端法兰端面斜后方的拉把装置处，左右各一个CMOS摄像机组成一组双目相机，每个相机以合适的角度安装，对隔水管法兰端面进行图像数据采集。



1-注水端 2-隔水管 3-封堵端

4-拉拔装置 5-底座 6-导轨 7、8-双目相机

图2-2 图像采集设备安装示意图

Fig.2-2 Image acquisition equipment installation schematic.

### 2.2.2 双目视觉定位流程设计

本文所设计的双目视觉定位流程图如图2-3所示，首先对摄像机系统进行双目标定，得到相机内外参和双目相机之间的旋转平移矩阵。然后将基准图像和待检测图像分别进行图像的噪声去噪、隔水管法兰端面感兴趣区域（ROI）提取、隔水管法兰端面孔洞的分割、亚像素XLD边缘的特征分析、针对XLD边缘的椭圆拟合、左右图像特征点之间的匹配、隔水管法兰端面特征点重建，然后可以分别得到基准图像三维特征点和待检测图像三维特征点，然后使用SVD算法进行位姿估计，估计基准隔水管位姿和待检测隔水管位姿之间的旋转平移矩阵并进行欧拉角方式描述，对得到的位姿进行判断是否符合对接安装公差要求，如果满足则发出对接命令到运动控制平台，控制注水端与隔水管进行对接，如不满足对接公差要求，则输出移动参数到运动控制平台，调整注水端与隔水管之间的相对位姿，然后拍摄调整后的图片进行再次检测，直到得到的位姿满足对接安装公差的要求。其中基准照片是利用倾角传感器、电子水准仪等辅助设备在人工条件下将隔水管法兰端面和注水端法兰端面调节到处于能够精准对接状态下所拍摄的图片。

|  |
| --- |
| 定位流程设计.tif |
| 图2-3双目视觉定位算法流程图 |
| Fig.2-3 Binocular vision location algorithm flow chart |

在整个定位流程中，双目标定、ROI提取、图像分割、XLD特征分析、椭圆拟合、特征点匹配性能的好坏将直接影响定位的精度，所以，本文着重对这几部分内容进行研究。

## 2.3 本章小结

本章主要介绍了双目视觉定位技术的研究目标和整体的一个设计方案，总体设计方案包含隔水管法兰端面图像采集方式的一个介绍和如何使用双目视觉定位算法进行隔水管检验检测装置中隔水管的对接的流程的介绍，还有本课题着重研究的内容侧重点的介绍。

# 3双目视觉测量系统数学模型

## 3.1引言

根据双目测量模型进行三维重建是由二维平面信息获取三维坐标的关键方法，本章通过双目相机之间存在的一个视差原理进行三维重建，并且使用张正友相机标定算法对本课题中的相机进行标定得到单目相机的内参矩阵和外参旋转平移矩阵。

## 双目视觉坐标系转换关系

### 坐标系转换关系

假设图像有行列，如图3-1所示，为像素坐标系，为坐标系原点[16]。在像素坐标系[17]下坐标点(u,v)的单位为pixel。由于不同相机之间的像素单元代表的物理尺寸不一样，如图3-1所示为一个图像坐标系，用表示，用这个坐标系来描述像素的物理位置。图像坐标系统的坐标原点是摄像机的光轴和摄像机的成像平面上产生的交点，像素坐标是。在理想情况下，该点在图像的中心位置，但由于一系列物理因素该位置将略有偏差。

图2-1 像素坐标系和图像坐标系

图3-1 像素坐标系和图像坐标系

Fig.3-1 Pixel coordinate system and image coordinate system

已知像素的水平和垂直大小分别为dX和dY，图像坐标系到像素坐标系的转换如式3-1所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑1） |

相机成像几何原理[18]如图3-2所示。O点为摄像机的光心，同时它也是相机坐标系原点，图中之间的距离代表摄像机的焦距。

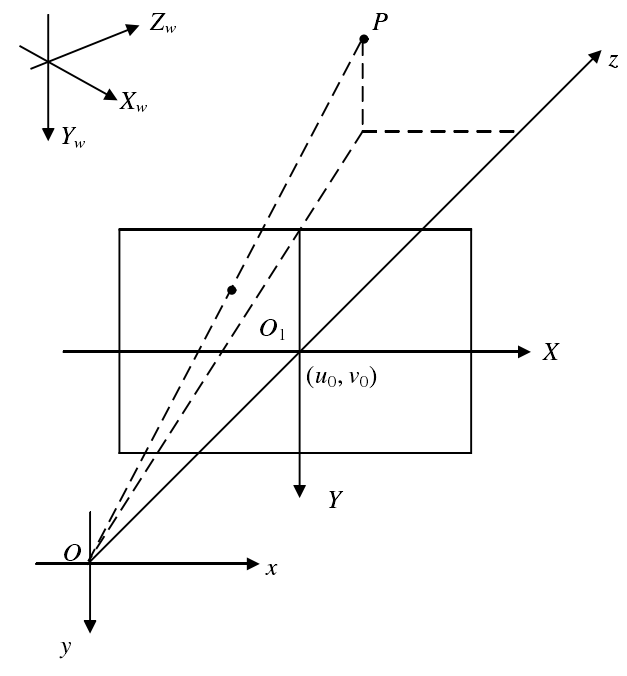


图3-2 相机成像几何原理

Fig.3-2 Camera imaging geometry principle

点P在世界坐标系为，在相机坐标系中的坐标为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑2） |

其中，T表示一个维数为3x1的一个平移向量；R为的正交单位矩阵； ；为的摄像就得投影矩阵矩阵，这个投影矩阵可以使用相机标定来进行获取。

### 针孔成像模型

针孔成像模型[19]中根据三角相似原理有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑3） |

其中，P点在图像坐标系下的坐标为， P点在相机坐标系下的坐标为，焦距为f。将式（3-3）转换为矩阵形式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑4） |

将式(3-1)和式(3-2)代入上式中，世界坐标与像素坐标间的对应关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑5） |

、是u、v轴向上的归一化焦距，被称为投影矩阵;由、、和组成，为相机内参，为外参。

### 双目视觉测量模型

图3-3为常见的汇聚式双目视觉模型原理图。

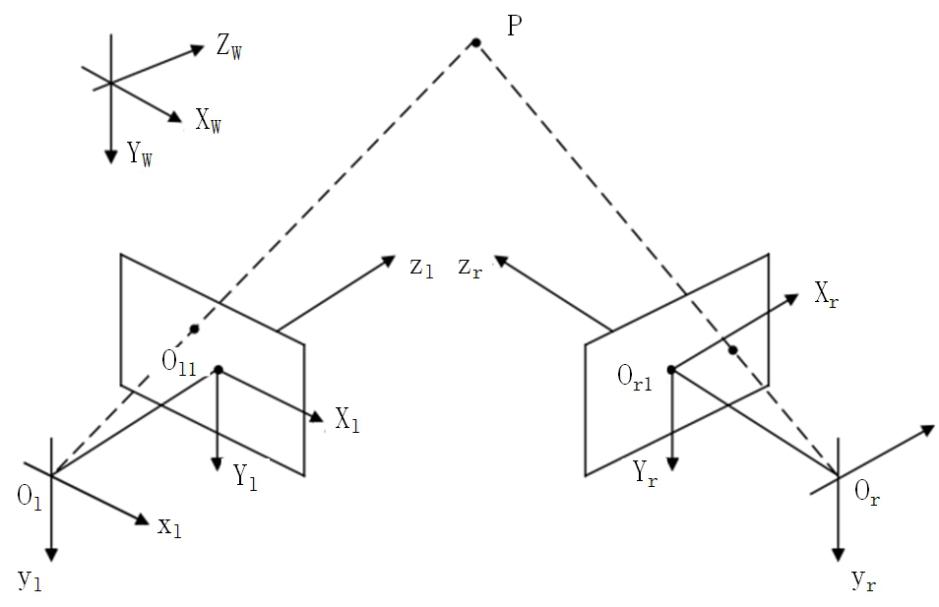


图3-3 汇聚式双目视觉模型

Fig.3-3 Binding binocular vision model

和为左右两个相机的投影矩阵[20]，有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑6） |

设P的世界坐标为 ，其像素坐标为和，由（3-5）有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑7） |
|  |  | （3-8） |

消除、可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑9） |

第一组方程式代表图3-3中的直线和第二组方程式代表图3-3中的直线。在不考虑物理因素，绝对理想的情况下时，这两条直线之间是可以相交于空间中的任意一点P点的，这个时候式（3-9）能够得到一个准确的解。P点在空间中的坐标值也能得到。但是，由于物理因素、测量误差和匹配误差，将会导致这两条直线并不能够真正的相交在一起。这个时候就需要用到最小二乘法来帮助求解方程的解，现将定义如下系数矩阵：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑10） |

那么P点的世界坐标可由如下公式计算得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑11） |

## 相机标定方法

### 3.3.1 畸变模型

根据相机透镜[21]的物理构造，可以将相机的透镜畸变分为枕形畸变和桶形畸变。枕形畸变和桶形畸变[22]的示意图如图3-4所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a. 桶形畸变 | b. 枕形畸变 |
| 图3-4 镜头畸变 | |
| Fig.3-4 Lens distortion | |

相机镜头畸变包含三种类型，其中径向畸变为对结果影响最大的畸变，如果考虑过多地畸变参数，反而会影响最后的标定精度[16]。因此，本课题只考虑镜头的径向的畸变对双目三维重建产生的影响，另外，只考虑摄像机镜头的径向畸变的摄像机成像模型如图3-5所示。

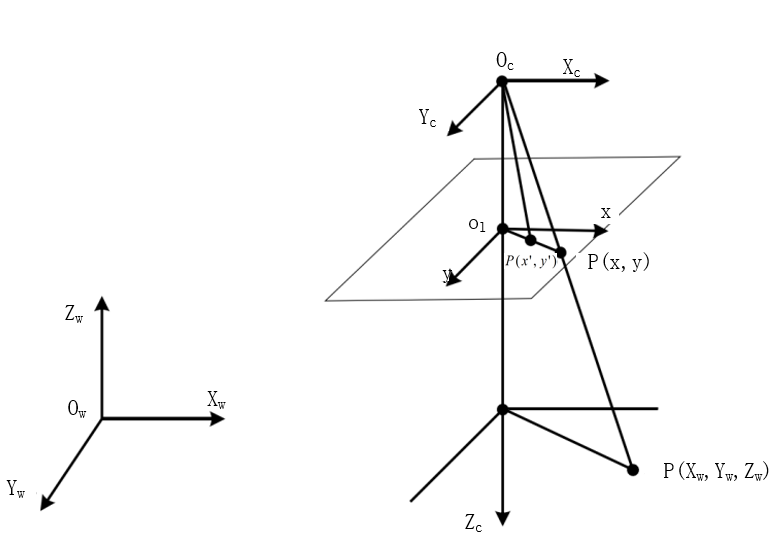


图3-5 考虑镜头径向畸变的相机模型

Fig.3-5 Camera model considering lens radial distortion

如果相机模型是如上图所示的线性的模型，那么点P的的物理坐标应该为P(x,y),但由于镜头的径向畸变使得空间点P没有落在P(x,y)。图像坐标系下的图像点P（x，y）和图像坐标系下的由于畸变原因实际的图像点有以下关系：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3-12） |

径向畸变的修正量可以表示为：径向扭曲校正可以表达为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3-13） |

其中，和是径向畸变参数。而且

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑14） |

在一般情况下，阶径向畸变已经能够满足我们对于非线性畸变的要求，以式（3-14）可以简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑15） |

在已知世界坐标系下的世界坐标点具体坐标值和图像坐标系下的像素坐标点具体坐标值的情况下可以计算出摄像机的内部参数。

### 3.3.2 单目相机标定

本课题采用常用的张正友标定算法对安装在隔水管检验检测装置上的摄像机进行摄像机的标定，根据世界坐标系下标定板上已知的物理坐标点和相应的图像坐标系上标定板图像上提取的圆心点的相应像素坐标就可以计算出投影矩阵，然后，再根据计算出来的投影矩阵经过计算就可以求取摄像机参数。

为标定板图像圆形标志点像素坐标，为物理坐标，其齐次坐标为和，空间点*M*与图像点*m*有如下的关系式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑16） |

S是非零比例因子，是外参，A是内参。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑17） |

将空间点的世界坐标系设置在用于摄像机标定的平面标定板上，也就是。表示外参中旋转矩阵的第列，那么由（3-16）式有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑18） |

标定板板上的角点与对应的图像点的转换矩阵为*H*即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑19） |

令，*H*为一个单应性矩阵，λ为一个常数。单应性矩阵*H*的解本质上是一个优化过程，它最小化了通过角点提取到的图像坐标和计算得到的图像坐标之间余量，目标函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑20） |

求出后，由λ*A*[*r*1*r*2 r3]=[*h*1*h*2  *h*3 ]和旋转矩阵正交（），可得:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑21） |

上式是内参物理约束，矩阵A中有五个自由度，而一个位置标定板角点坐标能够提供两个约束性的方程，所有要将标定板摆放在3个不同的位置使用摄像机拍摄3幅标定板图像再由式（3-20）求解摄像机的内部参数矩阵。

张正友标定法灵活、实用，标定所需器材简便易得，只需一张清晰打印的圆形标定板即可，标定出来的精度高，误差低，过程简单。

### 3.3.3双目相机标定

双目相机标定[23]可以求解两个相机间的旋转平移关系，双目左右相机与世界坐标系之间的关系为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑22） |
|  |  | （3-23） |

将（3-22）、（3-23）合并可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3‑24） |
|  |  | （3-25） |

### 3.3.4 试验验证及结果分析

（1）双目标定实验结果

在双目相机标定过程中，保持双目相机平台固定，将标定板任意角度和位置进行摆放，采集11幅标定板图像进行相机的标定，如图3-6、图3-7所示为使用安装在隔水管检验检测装置上的双目摄像机拍摄的标定板图像。

|  |
| --- |
|  |
| 图3-6 右相机标定板图像 |
| Fig.3-6 Right camera calibration plate image |

|  |
| --- |
|  |
| 图3-7 左相机标定板图像 |
| Fig.3-7 Left camera calibration plate image |

在进行标定时，需要将标定板放在摄像机的视野范围内，并将标定板以不同的位置和角度进行拍摄，图3-8为对标定板进行标定板区域检测以及圆形标志点提取后的效果图：

|  |
| --- |
|  |
| 图3-8 圆形标志点提取 |
| Fig.3-8 Circular mark point extraction |

采用 halcon标定进行相机标定得到2个CMOSE摄像机的内参数和双目相机之间的旋转平移矩阵如下表所示：

表3-1 双目相机标定参数

Tab.3-1 Binocular camera calibration parameters

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 左相机 | 右相机 |
| 焦距（mm） | 5.123 | 5.098 |
| Dx（um） | 4.799 | 4.8 |
| Dy（um） | 4.8 | 4.798 |
| 径向畸变系数  (1/) | -7.6861 | -6.9878 |
| 主点坐标 | （639.584，511.34） | （639.489,511.45） |
| 分辨率 | （1280，1024） | （1280，1024） |
| 外参 |  | |

（2）标定精度分析

本课题使用的CMOSE摄像机的像元尺寸为4.8*um*，镜头焦距为5*mm*。利用标定得到的相机内部参数矩阵计算得到左右相机的焦距分别是5.123mm和5.098*mm*，肯定了本次标定实验的正确进行。使用两种方法分析双目摄像机标定的精度：一种是常用的反投影残差，另一种通过双目标定参数矩阵，利用双目三维点重建原理重建出已经经过摄像机标定的标定板圆形标志点的圆心点的三维坐标和实际的物理坐标进行比较并分析误差。

反投影残差的原理是根据求解的标定参数和已知的标定板角点的三维坐标，根据式（2-5）计算出标定板上圆形标志点圆心的图像像素坐标，然后和使用图像算法进行提取的标定板图像上圆形圆心点像素坐标之间比较得到绝对误差。反投影残差的绝对值越小，说明标定精度越高，下图2-9（*a*）、（*b*）分别是左右相机的反投影残差，单位是pixel（像素）。

|  |  |
| --- | --- |
| 图片2.png | 图片3.png |
| （*a*）左相机反投影残差 | （*b*）右相机反投影残差 |
| 图3‑9 左右相机反投影残差（单位：像素）  Fig.3‑9 Reprojection error of left and right images(unit:pixel) | |

从上图可以看出，左相机在*x*和*y*上的反投影残差区间分别为[-0.7996, 0.1459]和[-0.1879, 0.1445]，残差的绝对值平均值分别是0.0448*pixel*和0.0396*pixel*。右相机在*x*和*y*方向上的反投影残差区间分别为[-0.4023, 0.3867]和[-0.2537, 0.3460]，其平均值的绝对值分别是0.1158*pixel*和0.0781*pixel*。

另一种评判标定精度的方法是根据标定出来的参数，利用双目三维重建原理重建标定圆心三维坐标并计算出相邻圆心间三维距离，然后和实际的圆心间距进行比较并分析误差。本课题将拍摄5幅圆形标志点的标定板图像，然后重建圆形标定板上标志点的三维坐标，然后计算相邻圆形圆心点标志点之间的距离。由于数据量较大，在每个标定板上选取部分数据展示在下表3-2中。

根据表格3-2可得双目相机重建误差在0.11mm以内，平均误差为0.0873mm，在隔水管自动对接中，双目标定精度完全符合双目立体重建的要求。同时分析具体的实验过程和实验结果可以得出，相机标定精度会受到一些外部客观因素的影响，例如：光线变化、标定板的平面和点距精度等以及双目相机拍摄过程中的抖动等问题。因此摄像机标定中，在使用高精度标定设备的同时，尽量避免这些因素的影响以达到高精度的标定效果。

表3‑2 双目相机标定三维误差(单位：毫米)

Tab.3‑2 3D error of binocular calibration (unit: mm)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试1 | 测试2 | 测试3 | 测试4 | 测试5 |
| 1 | 0.116393 | 0.135078 | 0.021031 | 0.163189 | 0.061998 |
| 2 | 0.06103 | 0.013953 | 0.053237 | 0.022788 | 0.100569 |
| 3 | 0.064924 | 0.08999 | 0.011054 | 0.062562 | 0.179893 |
| 4 | 0.061073 | 0.015492 | 0.035034 | 0.03376 | 0.12793 |
| 5 | 0.032084 | 0.121288 | 0.004034 | 0.191947 | 0.085875 |
| 6 | 0.05887 | 0.028639 | 0.012285 | 0.116237 | 0.070365 |
| 7 | 0.180203 | 0.002881 | 0.054169 | 0.158626 | 0.108287 |
| 8 | 0.275595 | 0.140238 | 0.024343 | 0.125239 | 0.064427 |
| 9 | 0.013316 | 0.083605 | 0.008961 | 0.105626 | 0.116623 |
| 10 | 0.058673 | 0.026873 | 0.091422 | 0.101243 | 0.075319 |
| 11 | 0.222583 | 0.058203 | 0.102856 | 0.148364 | 0.021938 |
| 12 | 0.153493 | 0.054773 | 0.140427 | 0.089553 | 0.150133 |
| 13 | 0.049025 | 0.187551 | 0.163991 | 0.214939 | 0.108999 |
| 14 | 0.088665 | 0.004907 | 0.019941 | 0.16187 | 0.063285 |
| 15 | 0.061622 | 0.009303 | 0.060246 | 0.067916 | 0.09002 |
| 16 | 0.053485 | 0.093421 | 0.195337 | 0.164713 | 0.056056 |
| 17 | 0.04302 | 0.128108 | 0.138739 | 0.067016 | 0.053637 |
| 18 | 0.094554 | 0.14047 | 0.069837 | 0.065945 | 0.045226 |
| 19 | 0.026625 | 0.085341 | 0.059027 | 0.037779 | 0.044898 |
| 20 | 0.277396 | 0.13677 | 0.06069 | 0.236153 | 0.069842 |
| 21 | 0.115615 | 0.008174 | 0.102714 | 0.071234 | 0.017333 |
| 22 | 0.04195 | 0.14723 | 0.057363 | 0.023807 | 0.005191 |
| 23 | 0.061549 | 0.089433 | 0.168461 | 0.206125 | 0.021046 |
| **平均值** | 0.0961627 | 0.0783356 | 0.0719651 | 0.114636 | 0.0756039 |

## 3.4 本章小结

针对隔水对接系统的双目定位技术测量方法，本章描述了双目视觉坐标系转换关系、针孔成像模型、双目视觉测量模型。最后对本课题在隔水管检验检测装置上使用的摄像机使用张正友标定法进行标定得到相机内外参，然后对双目相机进行标定得到双目相机之间的旋转平移矩阵，并使用两种不同的精度测量方式对相机标定进行精度测量分析。

# 特征点提取与立体匹配

基于机器视觉的双目视觉定位技术在检测之前先要对图像进行预处理， CCD 采集到的图像先要进行边缘检测处理，之后才能进行定位检测与位姿估计。本章主要介绍了图像去噪、图像增强、感兴趣区域提取、图像分割、XLD特征分析相关算法，且对各个算法的优缺点进行了对比分析，此本章还提出了模板匹配和HOG特征相结合的方法。

## 4.1图像去噪

在隔水管对接任务中，由于工厂条件下的干扰因素，图像在采集、获取中会受到噪声的干扰[2]。为了提高对隔水管法兰端面的定位检测结果的准确性，首先对图像进行去噪处理，下面介绍两种最常见的噪声，椒盐噪声和高斯噪声。

1. 椒盐噪声

在图像中随机出现数值在[0,255]区间个数的黑白点，并且随机分布到原始图像中，这种噪声生成的原因主要是图像在传输过程中受到环境干扰以及物理设备的影响。下述数学模型为椒盐噪声：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-1） |

其中，m 表示椒盐噪声的强度。

（2）高斯噪声

高斯噪声中的噪声具有高斯分布的数学性质，主要受电子电路干扰影响所致。下述数学模型为高斯噪声：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-2） |

其中，x表示为图像中的像素点的灰度值，为图像中的像素均值，为图像中的像素值的方差。图像去噪的目的是去除隔水管法兰端面图像中包含的噪声成分，提高图像的质量，在此基础上，尽量不要丢失图像的原始信息。

假设f(x,y)为大小为MN的图像，用尺寸mn的滤波器对原图进行处理：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-3） |

式中，m=2a+1,n=2b+1。

### 4.1.1均值滤波

均值滤波利用均值滤波模板对含有噪声的原始图像进行卷积计算，然后计算该邻域内的像素点的像素值的均值，然后将此均值去代替该领域内中心像素点的像素值。均值滤波是一种最为简单的线性滤波器，均值滤波的优点有：运行速度非常快，由于其算法复杂度低因此算法的实现容易，并且均值滤波在对高斯噪声的滤除方面具有非常好的抑制效果，但是该算法的缺点是在进行去噪的同时，也会使得原始图像的原本清晰的边缘细节模糊化，尤其是图像中的高频信号部分，高频信号就表示图像灰度变化比较的地方，这种地方一般发生在图像的边缘部分。

### 4.1.2 维纳滤波

维纳滤波是一个线性滤波器，如果它的输入不仅包含有用信号还包含没有的噪声。由于维纳滤波算法的方法是基于一种数学统计方法，并且它是一种可以实现自适应化最小均方误差的滤波器，维纳滤波使用的是基于图像和噪声相关矩阵的最优判据。维纳滤波器的输出值会跟随着图像中像素点的局部方差进行相应的调整，当维纳滤波器的方差越大时过滤器就对含有噪声的图像的平滑能力越强，最后对过滤后的图像的像素值与原始图像像素值f（x，y）之间的平均平方误差进行最小化计算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-4） |

其中E(·)为数学期望算子。

### 4.1.3 自适应中值滤波

是一种在中值滤波算法基础上进行改进的算法，经过对局部窗口的反复迭代和窗口的缩放进行最佳中值搜搜索，算法流程图如图 4-1 所示。

算法主要步骤为：

第一步：设定起始窗口大小W和最大窗口；

第二步：求领域内窗口灰度值、、；

第三步：如满足，<、则进行下一步判断操作，否则增大窗口大小W，执行一步操作；

第四步：替换领域窗口的中心像素灰度值。当时，保持不变，否将代替。



图4-1 自适应中值滤波流程图

Fig.4-1 Adaptive median filter flow chart

### 4.1.4 实验验证及结果分析

对隔水管图像进行椒盐噪声处理和高斯噪声处理，然后对图像分别使用均值滤波、维纳滤波、自适应中值滤波进行处理，如下图为处理之后的结果：

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| a.加噪图像 | |
|  |  |
| b.均值滤波5\*5窗口 | c. 均值滤波7\*7窗口 |
|  |  |
| d.维纳滤波5\*5窗口 | e.维纳滤波7\*7窗口 |
|  | 7.jpg |
| f.自适应中值滤波5\*5窗口 | g.自适应中值滤波7\*7窗口 |
| 图4-2去噪算法结果图 | |
| Fig.4-2 Denoising algorithm result graph | |

如4-2所示，将均值滤波、维纳滤波和自适应中值滤波这三种滤波方式的滤波窗口大小设置为5\*5和7\*7对添加了高斯噪声和椒盐噪声的图像进行滤波处理，图b、c所示为对含噪图像进行均值滤波后的效果，从结果上来看均值滤波不能将高斯噪声和椒盐噪声完全的去除，图d、e为对添加的噪声的图像进行维纳滤波去噪的效果，从结果上来看，维纳滤波对高斯噪声的抑制效果不错，但是对椒盐噪声的抑制处理效果并不理想，图f、g为使用自适应中值滤波对含噪的原始图像进行去噪后的效果，试验表明自适应中值滤波既可以很好的去除高斯噪声和椒盐噪声，同时又能保持良好边缘，不存在边缘模糊的情况，因此选用自适应中值滤波进行滤波处理。

## ROI感兴趣区域提取

视觉跟踪本质上可以看作是对视频帧中运动着的目标物体进行一系列定位，目标物体的运动在单一背景下可以简化为相邻两帧图像之间的差异。目标跟踪有如下三种分类：（1）基于跟踪目标的图像特征进行跟踪；（2）对跟踪目标进行匹配；（3）跟踪目标的运动模型。

跟踪目标[24]的特征表示就是选择适当的特征对所跟踪的目标进行描述，特征的选择应该具有良好的判别性，才能准确的将隔水管法兰端面从工厂复杂的背景中定位到。针对复杂背景及光照等情况，基于特征组合来更加准确完备的表述目标有待进一步研究。

对隔水管法兰端面进行匹配是基于模板的创建和相似性函数的度量，讲隔水管法兰端面设置为跟踪目标并对其进行特征描述，利用相似性函数判断在新的图像帧快速准确定位跟踪隔水管法兰端面。

### 传统模板匹配算法

为了检测隔水管法兰端面的位姿，需要使用分割算法将隔水管法兰端面的五个连接管道的孔洞提取出来，但是由于工厂条件复杂环境因素对准确分割存在极大影响，因此在待对接的目标对象进行对接前就需要首先对其进行定位。

定位一般有两种方法：一种是首先使用阈值分割[25]将图像中的目标对象分割出来，然后使用图像特征在图像中查找目标对象，由于隔水管自身结构复杂因此很难用单一阈值将其从图像中分割出来，并且这种方法在相对复杂的环境下鲁棒性比较低，另外一种方法则是通过模板匹配[26]的方式。

传统的模板匹配算法有：1）基于图像灰度的模板匹配：平均绝对差算法sad、平均平方差算法ssd、归一化互相关算法ncc等，基于图像灰度值的模板匹配算法原理简单实现简单，但是却不能克服光照变换在检测中的影响。2）基于图像边缘的模板匹配有：均方边缘距离法（SED）、Hausdorff距离和广义霍夫变换距离等，基于图像边缘的模板匹配算法利用图像中的像素边缘进行距离计算，基于边缘的模板匹配在存在目标对象被部分遮挡的情况下时，任然可以识别一部分对象，但是该算法对于光照变化很厉害的场景应用效果并不好。3）基于形状的模板匹配，基于形状的模板匹配算法通过计算模板区域内的梯度向量，使得梯度向量的内积最小化来达到最佳匹配位置的检测。此外在模板匹配的基础上还存在一些优秀的改进模板匹配算法，其中基于HOG特征向量的模板匹配算法便是其中的一种。传统的模板匹配算法容易实现，计算方便，但是却不能在光线变化大、角度变化大的场所使用，因为大量图像细节信息被忽略，本文使用模板匹配和HOG特征相结合的方法对隔水管法兰端面进行识别定位，经过实验验证，识别率相对于传统模板匹配算法明显提高，可靠性相对比较优越。下面首先对几种传统的模板匹配算法进行理论上的简单介绍，然后对模板匹配和HOG特征相结合的改进的模板匹配方法进行详细介绍。

#### （1）SSD算法

平均平方差算法（SSD）相似度量为计算模板图像与对应的图像搜索区域之间所有差值的平方和：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-5） |

上述表达式中，n代表模板领域内总的像素点个数， n=|T|。当在图像中检测到和模板一致的图像区域时相似度量为0。没有检测到与模板领域一致的区域时相似度量大于0。

#### （2）NCC算法

在光照条件不稳定的情况下，归一化互相关系数（NCC）相似度量不随任何线性的光照发生变化而变化，等式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-6） |

式中，为平均灰度值，是为方差：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-7） |
|  |  | （4-8） |

同样的，和分别为平均灰度值与方差：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-9） |
|  |  | （4-10） |

当相似性度量的绝对值为1时，则在图像当中检测到一个与模板一致的对象，当相似度绝对值越接近零时表示在该检测点领域内的图像与模板图像一致性越低。

#### （3）Hausdorff算法

Hausdorff距离算法对于图像中存在遮挡的情况具有很好的克服效果:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-11） |

上式中

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-12） |

T为模板图像中图像的像素边缘点，E为搜索的图像中的像素的边缘点。当T与E互为最接近时，将得到一个很小的最优匹配的距离值。

Hausdorff距离虽然在一定程度上可以解决部分遮挡和混乱问题，但是在遮挡部分过多时还是会出现很多的匹配错误情况。

#### （4）广义霍夫变换算法

当边缘像素点的梯度角在待测图像中和模板图像中计算的结果是一样的时候，向量可以帮助检测与模板区域一致的区域可能出现的地方，并在当前的像素点位置进行投票，将累计数组相应的数值加1。对模板图像上的一个边缘点，存在相同的梯度值偏移量，不同的方向向量，那么可以利用向量来在待测图像上计算模板可能存在的像素定位点，然后将计数数组加1。

图3-1.tif

图4-3 广义霍夫变换

Fig.4-3 Generalized Hough Transform

因此在搜索过程当中，我们必须将累计数组中与模板中边缘方向相同的点对应的所有元素加1。因此如何确定图像中一个像素点的方向向量的所有梯度偏移量是一项至关重要的事情。R-table表格的创建可以帮助实现这一功能，这个表格把梯度角度当成索引。其中的梯度角度与梯度偏移向量是相互对应的。另外表格中的梯度角度使用间隔的离散化数据，如下表4-1为R-table表。梯度角使用固定间距进行离散，可以增加检索效率。在进行搜索时利用R-table表能够提高寻找偏移向量的效率，在累计数组中加1。将累计数组中的局部最大值作为模板对象的位置。这种方法非常容易扩散，可以用来搜索存在旋转和缩放的目标物体。

表4-1梯度角与偏移向量关系表（R-table）

Tab.4-1 Gradient angle and offset vector relationship table(R-table)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| j |  | 偏移向量集合 |
| 0 | 0 |  |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| ... | ... | ... |

#### （5）基于形状的模板匹配

首先我们将用隔水管定义的模板区域的像素点定义为，然后利用图像处理中的边缘检测方法对模板区域中的每个像素点进行方向向量的计算。基于形状的模板匹配算法的相似性度量原则是利用模板图像与待检测图像之间的像素带点梯度向量的内积和的最小像素点确定为检测到的最佳匹配位置，基于形状的模板匹配的相似性度量如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-13） |

当被测对象被遮挡时，该区域内梯度向量与模板区域的梯度向量的内积值将会很小，对最终的总和的影响可以忽略不计；但是由于图像的亮度对梯度向量影响非常大，上述相似性度量还是不能消除光照的影响。

使用阈值对相似度度量值进行分割，可以检测到模板出现的位置，则要相似性度量计算出一个大概的区间范围：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-14） |

由于将方向向量进行了标准化的，因此该相似性度量可以克服光照的影响并且可以减少遮挡影响。

基于形状的模板匹配算法的相似性度量计算得到的值小于1。模板和检测区域完全相同时基于形状的模板匹配算法的相似性度量数值为1;当相似度小于0.5，表示检测对象被遮挡了50%，所以，可以设定一个直观的阈值来确定检测是区域。

### 4.2.2 基于HOG特征的模板匹配

#### （1）方向梯度直方图

将一幅图像划分为一块一块的相邻的区域，该区域称为细胞单元(cells)，然后对每一个区域计算方向梯度直方图，最后可生成一个特征描述子。为克服光照的影响对检测到的描述子进行对比度归一化，HOG实现详细过程如下:

1. 计算图像梯度

计算图像梯度，最常用的方法如公式（4-15）、（4-16）所示:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-15） |
|  |  | （4-16） |

上式中f(x,y)为像素点(x,y)的像素灰度值，Gx(x,y)为该像素点的水平方向上的梯度，Gy(x,y)为该像素点的垂直方向上的梯度。该像素点处的梯度幅值和梯度方向计算公式如下所示:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-17） |
|  |  | （4-18） |

图3-2.tif

图4-4 方向梯度直方图的构建图

Fig.4-4 Directional Gradient Histogram Construction

1. 构建梯度方向直方图

把图像分为多个“细胞单元 cell”，该cell一共有 8\*8 个像素点，将梯度方向360度分成9个方向块计算统计这8\*8个像素的梯度信息，并且将梯度值作为投影权值。如图4-4所示：如果一个点的梯度大小是5，梯度方向是40~60度，那么就在方向梯度直方图的第3个bin上累计添加数值5。将隔水管法兰端面图像划分为很多个大小一致的块（block），然后这些大小一致的块（block）在划分成很多个cell，在每一个划分的block内都进行计算归一化梯度直方图，最后，所有计算得到的特征向量合并在一起就得到了最终的HOG特征向量。每个块内的特征并不唯一会在最后的特征向量中出现多次，这是由于这些区间有互相重叠的情况，最后进行归一化处理，计算公式如下:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-19） |

式中，v为没有进行归一化处理的向量；δ为一个部位0的很小的一个常数；则表示向量v 的k阶范数。

1. 收集 HOG 特征

所有块的特征向量将组合成为最终的HOG特征向量。

#### （2）模板匹配

将隔水管法兰端面作为模板区域，如图4-5所示w为模板区域，模板区域从图像f的左上角开始滑动，当模板中心处于图像边界时需对图像边界进行模板宽度一半距离大小的填充。模板图像从待测图像的左上角第一个像素逐像素移动到待测图像的右下角的最后一个像素，每当模板区域移动了一个像素需要计算一次相似度，然后将相似度返回值存到生成的结果图像中。

模板匹配机理.tif

图4-5 模板匹配机理

Fig.4-5 Template matching mechanism

将模板图像和待检测区域分别划分为块并分别计算块的HOG特征，将得到的两个HOG特征进行欧式距离计算，距离最小的点则为检测定位结果。

### 4.2.3 图像金字塔加速

本课题采用图像金字塔[27]算法让隔水管在线自动对接的速度得到提升，在进行匹配时从原来的直接整幅图像搜索变为从金字塔的较高层搜索，得到一个大概位姿，再从次高层大概位姿领域范围内进行搜索直到金字塔最底层，如图4-6为该算法流程图。



图4-6图像金字塔算法流程图

Fig.4-6 Image pyramid algorithm flow chart

具体步骤如下：

1）使用如图4-7的22均值滤波模板对模板图像和待匹配图像分别进行卷积计算达到对图像进行滤波的效果。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

图4-7均值滤波模板

Fig.4-7 Mean filter template

2）将模板图像和待测图像经过图像的多次缩小2倍可以得到如图4-8所示的图像金字塔，下图为隔水管法兰端面图像的图像金字塔15层。



（a） （b） (c) (d) (e)

（a）图像金字塔1层（b）图像金字塔2层

（c）图像金字塔3层（d）图像金字塔4层

（e）图像金字塔5层

图4-8 隔水管法兰端面图像金字塔效果图

Fig.4-8 Image pyramid Renderings of Riser Flange flat

3）从图4-8中我们可以看出在隔水管法兰端面图像金字塔第5层上，隔水管法兰端面与背景已经难以辨认，所以从图像金字塔第4层开始进行匹配搜索。

4）将匹配点坐标投射到图像金字塔的次低层中匹配结果的局部领域范围内，一直进行搜索直到检测到图像金字塔的最底层。

### 4.2.4 实验验证及结果分析

由于隔水管检验检测装置中的运动控制设备可以对隔水管进行精确的移动控制，因此对移动控制设备手动输入位移量和旋转量（真值），并在移动完成后拍摄下当前位姿的图片，如图4-9中所示为摄像机所拍摄的30组不同位姿下的隔水管图片，并在拍摄过程中记录下当前图片的位移和旋转量，其中基准照片是利用倾角传感器、电子水准仪等辅助设备在人工条件下将隔水管法兰端面和注水端法兰端面调节到处于能够精准对接状态下所拍摄的图片。

|  |
| --- |
|  |
| 图4-9 右相机测试图片 |
| Fig.4-9 Right camera test picture |

|  |
| --- |
|  |
| 图4-10左相机测试图片 |
| Fig.4-10 Left camera test pictures |

使用上述的六种模板匹配分别检测出30组不同位姿下的隔水管图片相对于基准图片的位移估计量、，旋转估计量，由于篇幅原因展示部分实验数据如表4-3所示：

表4-3 隔水管位姿测量结果

Fig.4-3 Measurement results of riser pose

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 位移估计量(毫米) | | 旋转估计量（º） |
|  |  |  |
| 真值 | | 0 | 0 | 0 |
| 测  试  值 | ssd | 4.6178 | 0.9056 | 6.6865 |
| Ncc | 3.1119 | 1.795 | 1.795 |
| HT | 2.0275 | 2.5699 | 2.5699 |
| GHT | 1.7977 | 1.7977 | 2.7977 |
| Shape | 2.2092 | 2.2092 | 2.2092 |
| HOG | 0.9336 | 0.6128 | 0.7336 |
| 真值 | | 2 | 2 | 2 |
| 测  试  值 | ssd | 5.0305 | 5.6179 | 7.5865 |
| Ncc | 4.9791 | 3.7416 | 3.7416 |
| HT | 4.6644 | 4.6881 | 4.6881 |
| GHT | 3.7009 | 3.7009 | 4.7009 |
| Shape | 3.1104 | 3.1104 | 3.1104 |
| HOG | 2.8806 | 2.3436 | 2.7806 |
| 真值 | | 4 | 4 | 4 |
| 测试  值 | ssd | 4.9056 | 7.618 | 8.4865 |
| Ncc | 5.795 | 4.451 | 4.451 |
| HT | 6.5699 | 5.383 | 6.5699 |
| GHT | 6.3779 | 6.3779 | 6.3779 |
| Shape | 5.8517 | 5.8517 | 5.8517 |
| HOG | 4.7717 | 5.2243 | 4.7717 |

如图4-11中所示为将上诉表格中的测试值与真实值之间进行比较得到绝对误差并将其以曲线的形式呈现，从图中的绝对误差分析得到基于HOG的模板匹配算法在定位精度上有显著的提升。

|  |
| --- |
| 模板匹配绝对误差.tif |
| 图4-11 模板匹配绝对误差曲线 |
| Fig.4-11 Template matching Absolute error curve |

但是上诉的绝对误差可能存在一部分不可估因素造成的偶然误差，使用平均误差和均方差进一步进行分析，如下图所示为平均误差和均方差分析柱状图。

|  |
| --- |
| 模板匹配平均误差.tif |
| 图4-12 模板匹配平均误差柱状图 |
| Fig.4-12 Template matching Average error histogram |

|  |
| --- |
| 模板匹配均方差柱状图.png |
| 图4-13模板匹配均方差柱状图 |
| Fig.4-13 Template matching Mean square histogram |

通过上述柱状图分析发现基于HOG特征的模板匹配算法在ex、ey上的平均误差和均方差为综合最优算法，在ex、ey上的精度达到0.8mm以内，满足机械安装公差0.8mm，在上的精达到0.8度，满足机械安装公差0.1度，因此选择使用基于HOG特征的模板匹配算法对隔水管进行定位检测。

从上述实验中可以看出，基于HOG特征的模板匹配算法在定位检测上具有很大的优势，如下图所示为使用模板匹配进行的前景定位效果图，从图中可以看出，基于HOG特征的模板匹配算法精确的将隔水管区域提取出来，并将工厂复杂环境分离出去。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a.左相机获取图像 | b.右相机获取图像 |
| 图4-14分离前景效果图 | |
| Fig.4-14 Separation foreground renderings | |

## 图像分割

利用模板匹配定位出隔水管法兰端面之后，需要针对该区域进行图像分割，分割出隔水管法兰端面上的特征圆孔，利用圆孔圆心进行位姿描述。

### 阈值分割算法原理

阈值分割是一种区域分割技术，它对物体与背景有较强对比的景物的分割特别有作用，因其简单直观、易于实现而在图像分割中占有重要的位置[28]。

一幅图像包括目标、背景和噪声，怎样从多值的灰度图像中提取出对象物[29]，设定某一阈值，可以用t将图像的数据分成两部分，大于t的像素群和小于t的像素群，例如，输入图像为f(x,y)，输出图像为，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-19） |

或

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-20） |

上诉表达式为灰度图像的图像二值化，也可以将其称为阈值分割，它的目的是在图像灰度值中找到一个适合的阈值t将灰度图像f(x,y)分割称为两个部分：一个是被测目标部分和另一个是背景部分。

但是实际情况往往不是理想的那样，我们在实际情况下拍摄到的想要分割的被测对象部分与图像当中的背景部分并不是十分完全理想的分别分布在两个可以区分开来的灰度区域，这个时候对整幅图像设置两个或者多个阈值来进行图像分前景分割就非常有必要了，假设将当做整幅图像对前景物体的对象进行阈值分割，那么则需要用以下两个公式对整幅图像进行计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-19） |

或

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-19） |

在利用取阈值方法来分割灰度图像一般都对图像有一定的假设，即图像由具有单峰灰度分布的目标和背景组成，处于目标或背景内部相邻像素间的灰度值是高度相关的，但处于目标和背景交界处两边的像素在灰度值上有很大的差别。如果一幅图像满足这些条件，它的灰度直方图基本上可以看做分别由对应目标和背景的两个单峰直方图混合构成的。进一步，如果这两个分布大小接近且均值相距足够远，而且两部分的方差也足够小，则直方图应为较为明显的双峰。

阈值分割的优点是该算法的实现很简单，当不同类的灰色值或其他特征有很大差异时，可以有效地分割图像。

阈值分割存在两个缺点是：一个是当需要我们进行前景提取的图像中没有一个大范围的灰度变化或者灰度差别的时候，对于将图像的前景从背景当中分割出来就变得异常的困难。另一个是阈值分割算法只将整幅图像灰度值进行运算。因此，如果当需要分割的图像存在很多噪声的情况下就非常难于被分割出来。

### 亚像素阈值分割

阈值分割算法如式（4-20）所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-20） |

上述公式当中中：表示隔水管法兰端面图像上像素点（r,c）处的灰度值，数值代表隔水管图像上隔水管法兰端面区域灰度直方图上处于峰值的像素点的灰度值，代表隔水管图像上隔水管对接系统安装的工厂环境区域灰度直方图上处于峰值的像素点的灰度值，其中S表示隔水管图像上一个满足公式（4-20）的像素点的集合。

亚像素精度阈值分割算法[30]和普通的阈值分割算法最明确的区别是:为了获得隔水管图像上隔水管法兰端面圆孔的边缘信息,必须将隔水管图像的离散性质的函数转变成为连续性质的函数,对隔水管图像上相邻的两个像素之间的灰度值边缘使用双线性插值算法的处理，双线性插值算法的主要目的是将处于像素级精度的隔水管图像转化为亚像素精度级的精度。本文中的双线性插值是在水平维度上和垂直维度上进行线性插值的一个过程。因此，通过将常数函数与“连续”边缘函数相结合，可以得到亚像素精度阈值分割过程的结果。

以4个相邻的像素构成22个区域作为例子，具体步骤的描述如图4-15所示。图像上任意的四个相邻的像素点的中心可以组成一个像素大小的正方形。在这个重新组成的区域里面，每一个顶点的灰度值都对应一个不一样的权重，这个权重受到距离的影响，也就是需要进行的插值点到每一个顶点的水平距离和垂直距离的影响。并且这种关系是一种反比例关系，当一个插值点到一个顶点的距离变大时，那么这个像素值的权重将会变小。

图3-7.tif

图4-15双线性插值法对像素级单位的细分过程

Fig.4-15 Bilinear interpolation of pixel-level units of the subdivision process

我们首先对需要进行的插值图像进行水平维度上的一个线性插值，具体操作如式（4-21）和式（4-22）所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-21） |
|  |  | （4-22） |

在上面两式中：i、j表示图像像素点的坐标位置，该数值是非负的整数；x，y就是处于顶点处的像素值在进行插值所携带的权重，这个权重在范围并且是一个浮点数；、、，是图像上面任意的２×２领域里面４个相邻像素点的灰度值；g(M)和g(N)是经过水平维度插值之后生成的像素点和处的灰度值。

垂直方向上的线性插值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-23） |

将式（4-21）和式（4-22）代入式（4-23），插值点的灰度值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-24） |

用矩阵运算表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-25） |

显然，、、、这４个像素点对插值点的灰度值权重分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-26） |

在进行图像插值的像素值的灰度值计算时，这个灰度值将有256种结果，并且其区间范围为0~255。在正常情况下，在插值细分过程中，根据公式（4-26）计算插值点灰度值为浮点数，浮点数必须对其取整。图像当中常用的取整方法是先放大变量1-x、1-y的倍数使其值变化到一个整数的位置，最后对该数值除以一个相应的整数称为最终的一个插值结果，要的到最终的亚像素轮廓需要使用线段将前面计算得到的插值点进行连接。

### 4.3.3 实验验证及结果分析

如图4-16、图4-17为使用基于区域的阈值分割算法进行分割后得到的结果，图b显示了该区域的的灰度直方图，根据灰度值方图的表现形式，可以发现该区域有明确的波峰与波谷，因此将阈值设置在两个波谷处，使用基于区域的阈值分割可以将孔洞分割出来，但是同时也分割出来带有干扰的孔洞和表面反光引起的干扰区域。

|  |  |
| --- | --- |
|  | 1.bmp |
| a. 图像分割效果 | b. 图像灰度直方图 |
| 图4-16 图像阈值分割效果图 | |
| Fig.4-16 image threshold segmentation effect map | |

由于本课题需要达到较高定位检测精度，基于区域的分割为像素级别，因此本课题继续深入使用亚像素阈值分割进行分割处理，对隔水管图像设定一个的阈值范围然后使用亚像素阈值分割算法对隔水管图像上隔水管法兰端面与水管连接的孔洞进行分割将得到一个亚像素级别的孔洞边缘。如图4-18所示为对隔水管图像使用亚像素阈值分割算法进行分割后的处理效果，从图中可以看出隔水管法兰端面与水管连接的孔洞边缘被检测到并且达到了亚像素级别的精度。

|  |
| --- |
|  |
| 图4-18 图像分割效果图 |
| Fig.4-18 Image segmentation renderings |

## XLD特征分析

经过亚像素阈值分割后，图像中不但包含了描述位姿所需的圆形轮廓，还包含一些干扰的亚像素边缘。因此，此时需要对所有的亚像素边缘进行特征分析，将所需的圆形轮廓提取出来并去除干扰的亚像素轮廓。XLD特征[31]有如下特征：

1. 长度L

计算亚像素级别分割出来的边缘线段XLD的长度。长度的计算是计算处于等高线或则连续点线段上的一个的欧氏距离的和。如果超过一个轮廓或多边形被传递，结果就会以相同的顺序存储在元组中，就像XLD中的相应的轮廓或多边形一样。

1. 圆形度

如果F是轮廓或多边形的封闭区域，max是从中心到所有轮廓或多边形像素的最大距离，则形状因子“圆度”定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-27） |

如果正在检测的亚像素线段计算得到的圆形度为1那么表明这个线段为圆。如果轮廓或多边形包围细长的区域，则圆度小于1。

1. 紧密度

如果L是长度，F是轮廓或多边形的封闭区域，则形状因子紧密度定义为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-28） |

如果正在检测的亚像素线段计算得到的紧密度为1。如果正在检测的亚像素线段为一个细长的线段形状，则紧密度大于1。

### 4.4.1实验验证及结果分析

对图4-18中进行分割之后的XLD进行长度特征的分析，分析得到的长度特征直方图如图4-19中b所示，将亚像素轮廓的长度范围设置在[48.01，314.31]之间，图4-19中a为使用长度特征进行筛选后的亚像素轮廓，将区域中分割得到的较小的干扰轮廓剔除。

|  |  |
| --- | --- |
|  | contleng.jpg |
| a.长度特征处理效果图 | b.长度特征直方图 |
| 图4-19 XLD长度特征分析 | |
| Fig.4-19 XLD length characterization | |

对图4-19长度特征处理之后的XLD进行圆形度特征的分析，分析得到的圆形度特征直方图如图4-20中b所示，将亚像素轮廓的圆形度范围设置在[0.62228，1]之间，图4-20中a为使用圆形度特征进行筛选后的亚像素轮廓，将区域中分割得到的在圆形度特征范围内的亚像素轮廓保留。

|  |  |
| --- | --- |
|  | circle.jpg |
| a.圆形度特征处理效果图 | b.圆形度特征直方图 |
| 图4-20 XLD圆形度特征分析 | |
| Fig.4-20 XLD circularity feature analysis | |

如下图所示为使用紧密度特征进行筛选的亚像素轮廓，本文将亚像素轮廓的紧密度范围设置在[0.9692，1.143]之间，将区域中分割得到的在紧密度特征设定范围内的亚像素轮廓保留，经过三种特征分析即将隔水管法兰端面的与水管相连接的孔洞的亚像素边缘保留下来。

|  |  |
| --- | --- |
|  | compass.jpg |
| a.紧密度特征处理效果图 | b.紧密度特征直方图 |
| 图3-21 XLD紧密度特征分析 | |
| Fig.3-21 XLD Tightness Feature Analysis | |

## 基于椭圆拟合的特征点提取

本课题将隔水管法兰端面上特征圆的圆心作为需要进行重建的特征点，用于描述隔水管的位姿，因此需对上述提取出来的边缘进行椭圆拟合得到拟合的圆心。椭圆拟合中最常见的拟合方式是使用最小二乘法进行拟合，接下来将对基于代数法拟合的最小二乘法进行详细的介绍。

### 4.5.1 代数法拟合

由数学定义可知，椭圆可以分为两种不同的方式进行表达，一种是基于数学代数表示式的椭圆方程，该种方法进行定义的椭圆方程如式（4-29）所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-29） |

另一种比较利用人们理解的方法是使用表示椭圆性质的五个物理参数表示，其中物理参数包含：椭圆的中心 ，长半轴长度和短半轴的长度(a,b)以及长轴相对于x坐标轴的转角，该转角范围在之间。参数的物理意义如图4-22所示，这两种不同方法对椭圆进行表示的参数可以用方程（4-30）~（4-32）进行相互之间的转换。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-30） |
|  |  | （4-31） |
|  |  | （4-32） |
|  |  | （4-33） |
|  |  | （4-34） |

图3-8.tif

图4-22二维平面中的椭圆

Fig.4-22 Ellipse in two-dimensional plane

如果将椭圆方程如式（4-35）的代数表达形式经过转换成为两个向量之间的乘法表出的形式，如下所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-35） |

其中系数向量，为，因为误差在点不为零，将认为是点到隐式方程的代数距离，根据最小二乘法原理，通过对代数距离的求和可以得到直线拟合的问题

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-36） |

最小化来实现。由极值原理，使值为最小，有

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （3-37） |

由极值原理得到的这个线性方程组，使用分割得到亚像素边缘点组合可以求取到线性方程组的解，也就是解得方程系数A、B、C、D、E和f的值，最后可以生成得到椭圆方程。

### 4.5.2 基于边界的椭圆拟合

当使用上述的基于代数法的最小二乘方法进行椭圆拟合时,并没有考虑到椭圆和原始边界之间的拟合程度问题，这样产生的椭圆大于偏离实际,该方法的结果往往不是人们满意。在这种情况下，很有必要对拟合的椭圆进行评估和筛选，本课题提出了一种基于边界的最小二乘椭圆拟合算法[32]。

如果为拟合后的椭圆，为拟合所采用的边界点，先遍历用于拟合的边界上所有样本点，如果各个点到已拟合得到的椭圆之间的距离（d）小于某阈值，称该样本点为匹配点() ，用进行计数，最后，求取对于该拟合椭圆的匹配点的总个数() ，拟合率为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-38） |

对于椭圆来说它有两个非常重要的物理参数一个是它的长半轴（a）另外一个则是它的短半轴（b），我们可以使用定义椭圆率（）和椭圆面积差的方式来筛选使用最小二乘法对亚像素边缘进行拟合得到的椭圆。

椭圆率定义为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-39） |

椭圆率的物理含义是描写拟合所得的椭圆是否趋向于一个圆的拟合程度，另外对于椭圆的大小问题可以利用到拟合所得的长短轴值的大小来进行筛选。

面积差的定义：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-40） |

其中，是在理想情况下希望拟合得到的椭圆的面积，是实际情况下使用最小二乘法拟合得到的椭圆的面积。面积差则定义为两者面积之间差的绝对值，面积差绝对值相对较小的椭圆更加接近于理想情况下人们希望拟合得到的椭圆。具体是基于边界的椭圆拟合算法流程如下所示：

1. 分割图像的边界;
2. 提取图像上分割得到的边界点，当边界点的个数达到一定的数量的时候，开始利用小二乘法对提取的边界点集合进行椭圆的拟合; 如果提取到的边界点数量不够进行椭圆拟合，则需要重新选择新的边界点集合。

3) 计算拟合率和椭圆率。

4) 若满足椭圆率和拟合率均大于阈值，则记录所得椭圆E。

5) 计算面积差。根据公式（4-40）计算面积差。

6) 循环步骤 2) ～ 步骤 5) 之间的步骤，然后进行拟合椭圆与理想椭圆之间面积差的计算，最后筛选出面积差最小的椭圆作为最终拟合得到的椭圆。

具体的基于边界的椭圆拟合算法流程图如图4-23所示。

椭圆拟合流程图.tif

图4-23 算法流程图

Fig.4-23 Algorithm flowchart

### 4.5.3实验验证及结果分析

如下图所示为使用基于边界的椭圆拟合方法将使用亚像素分割得到的上述边缘进行椭圆拟合的结果，通过实验发现通过基于边界的椭圆拟合之后，拟合得到的椭圆相对于拟合前的椭圆修正了其椭圆边缘不平滑的显现，实验结果表明该算法能够正确将椭圆拟合到法兰端面上与水管相连接到的孔洞上。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a.椭圆拟合前 | b.椭圆拟合后 |
| 图4-21 椭圆拟合效果图 | |
| Fig.4-21 Elliptic fitting effect diagram | |

表3-3为上述过程中拟合得到的椭圆信息，包含椭圆的长短轴和圆心坐标，得到的圆心坐标信息和椭圆长短轴用于后面椭圆的匹配。

表3-3 左图像椭圆拟合结果

Tab.3-3 Left image Ellipse fitting result

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Row | 567.702 | 695.777 | 695.488 | 875.99 | 942.288 | 950.842 |
| Column | 812.656 | 1041.25 | 584.579 | 1002.76 | 583.102 | 1031.86 |
| 长轴 | 39.0843 | 47.9901 | 27.1382 | 8.7483 | 44.9509 | 27.8721 |
| 短轴 | 38.4413 | 45.4531 | 25.9538 | 7.99433 | 41.9065 | 25.6635 |

## 特征点匹配

特征点匹配是指空间中的点投影在左右图像上的图像点进行一一匹配的对应关系。它的基本过程是在一个图像中搜索另一个图像的特征点的对应点，而两个点对应的点是同一空间点的投影在实际的应用过程中，特征点匹配是双目立体视觉中最困难最有挑战性的一个步骤[33-34]。

### 极限几何关系

在图4-25中所示的是双目摄像机之间所存在的物理极限几何的关系。它与双目摄像机在什么物理环境下工作没有关系，极限几何关系只跟双目视觉系统之间的固定联系和相机的物理生产参数以及两个相机的物理结构有关。通过双目相机间物理极限几何关系可以将左右图像上的特征点匹配搜索从整个图像平面上的逐像素点搜索变成只需要在极限与图像成像平面上的交点形成的极限上搜索，这种从二维维度上的搜索变为一维维度上的搜索明显的将特征点之间的匹配效率提高了。

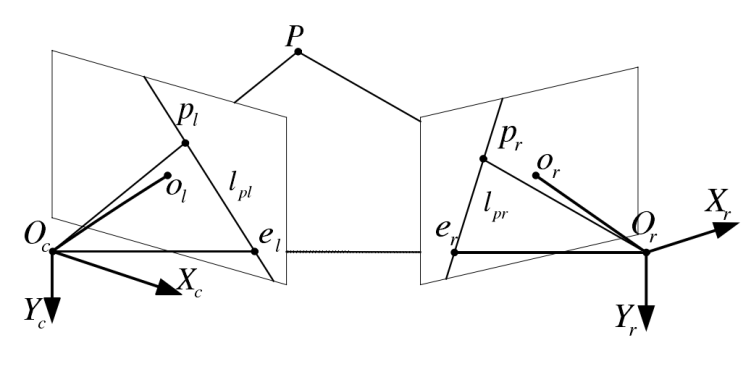


图4-25 极限几何关系

Fig.4-25 Limit geometric relationship

如图4-26所示，在双目摄像机的左相机图像平面上，假设空间中任意一点P在相机图像平面上的投影点是，而右相机的图像平面上的对应的投影点点，也就是说互相为一组匹配对应点。由光学物理成像系统特性可知点P、、这三个点和双目相机上的两个光心处于一个平面，我们称该平面为双目摄像机的极平面。极平面还有另外一个重要的性质，那就是极平面与双目相机中的两个图像平面存在交汇的情况，这种交汇将构成如下图所示的两条直线、，它们被称为双目相机中的极线。另外双目摄像机的光心在左右相机的图像平面上分别存在一个投影点，我们将这种投影点称之为极点。

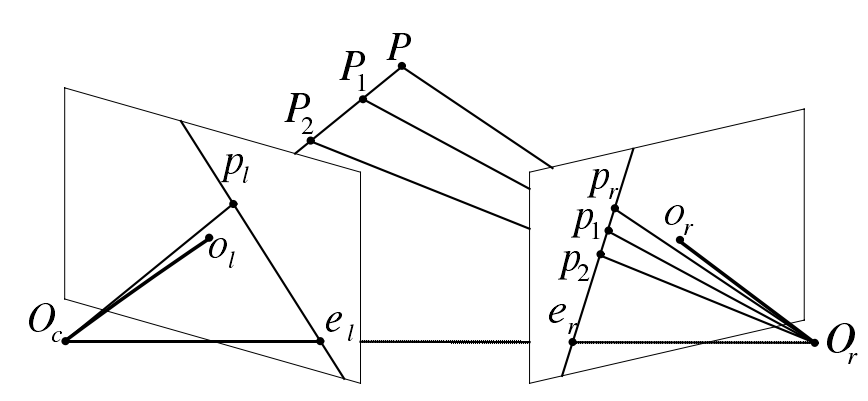


图4-26 极限约束

Fig.4-26 Epipolar restriction

如图4-26所示，在左相机中点在极限上，它们相互之间存在互相对应的关系，在右相机中点在极限上，它们之间存在相互对应的关系。如果已知左相机中的图像平面上的点的位置，那么在右相机中的图像平面进行搜索时在右边图像的极线上搜索就可以得到对应的匹配点，反之亦然。

### 极限约束方程

将式(4-41)重新改写为（4-42）：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-41） |
|  |  | （4-42） |

式中，是空间中任意一点p的世界坐标的齐次表达方式。将双目相机中投影矩阵与，这两个投影矩阵的维数为3x4，将这两个投影矩阵中的左边3x3矩阵分别令为和，将这两个投影矩阵中最右边的3x1矩阵令为和。将记作，其中，式(4-42)可写成以下形式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-43） |

式(4-43)中消去 X 可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-44） |

公式（4-44）可以列出三个数学方程组成一个方程组，如果在已知尺度因子和的情况下，那么就可以得到空间点在左相机图像平面的投影点和空间点在右相机平面的投影点之间的关系式。下面描述了另一种更有用的极线约束形式。如果有矢量，那么矢量k可以定义一个如下式所示的反对称阵，表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-45） |

由定义可知，，是一个不可逆的矩阵。

方程(4-44)右边部分等于m，也就是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-46） |

将由 m 定义的反对称阵左乘式(4-44)的两边，也就是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4‑47） |

将式(4-47)两边同除以，并记，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-48） |

又，故该向量与正交。将右乘式(4-48)，即可将上述方程中的尺度因子s消去：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-49） |

式(4-49)给出了和必须满足的关系。显然，已知的时候，式(4-45)代表一个关于的在右图像上的极限方程。反过来，我们知道，(4-45)代表一个关于的线性方程。

假如，那么可以将式(4-49)变换为：，其中F是双目相机之间进行变换的基本矩阵。基本矩阵可以实现左极限与右极点之间的转换以及右极限与左极点之间的转换：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-50） |

如果经过相机标定得到了双目相机中左右摄像机的内部参数矩阵分别为、，双目摄像机之间的旋转矩阵R和平移向量t。然后，也可以表示极平面方程[35]：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-51） |

其中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-52） |

因此，得到了基本矩阵的表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-53） |

由从方程（4-53）可以看出，基础矩阵F包含了双目摄像机的所有参数：左右摄像机的内部参数矩阵和以及两个摄像机之间的平移矢量t和旋转矩阵R。基本矩阵可以实现极点与极线之间的关系约束因此极线方程具有指导特征点匹配的能力。

### 已知极限几何的对应点匹配方法

如果我们的双目摄像机已经进行过相机的标定得到了表示相机之间关系的基础矩阵F。

对于左边图像上的一个特征点，设其在右图像上的对应点为，然后这两个点必须满足下面的方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-54） |

在实际的成像过程中，由于噪声干扰和摄像机镜头畸变等因素，即使准确匹配的点对（）也不能完全满足式(4-54)。所以，在实际情况下使用时将设置一个不为零的阈值通过不等式的方式进行约束：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （4-55） |

在公式中，δ为误差阈值，它的大小是根据匹配精度要求确定的。

将使用图像分割和椭圆拟合之后得到的特征点对，代入公式(4-55)中。如果带入的点对大于给定的阈值，那么就认为这两个点并不是相互对应的匹配点，就将他们删除，反之，则保留。

### 4.6.4 实验验证及结果分析

双目摄像机之间所存在的物理极限几何的关系。它与双目摄像机在什么物理环境下工作没有关系，极限几何关系只跟双目视觉系统之间的固定联系和相机的物理生产参数以及两个相机的物理结构有关。通过双目相机间物理极限几何关系可以将左右图像上的特征点匹配搜索从整个图像平面上的逐像素点搜索变成只需要在极限与图像成像平面上的交点形成的极限上搜索。如下图所示为将左右相机所拍摄的隔水管图片进行极限约束后的效果图，经过极限约束后匹配点对在同一水平线上。

|  |
| --- |
|  |
| 图3-27 极限约束效果图 |
| Fig.3-27 Limit Constraints renderings |

### 附加匹配约束条件

通过极线约束虽然可以将左右图像上提取到的特征点匹配过程从平面的二维搜索变成一维上的搜索，但是却不能识别原本就处于同一极限上的两个误匹配点，如下图中的圆孔2与圆孔3以及圆孔4与圆孔5在匹配的过程中，由于其椭圆圆心特征点近似在左右相机的同一极限约束上上所以无法将其正确一一对应的匹配，本课题在极限约束的基础上附加另一个约束条件对特征点进行匹配约束。考虑到几个特征圆之间的拓扑关系的一致性，以及易产生混淆匹配的圆孔2与圆孔3以及圆孔4与圆孔5之间的大小不一致，经计算两易混淆的圆孔长轴差为50个像素，该差距已经足以得到正确的匹配关系，因此本文将利用上述椭圆拟合出的长轴作为另外一个匹配过程中的约束条件。

左图像匹配圆.tif右图像匹配点.tif

a.左视图 b.右视图

图4-28 双目相机左右视图

Fig.4-28 Binocular camera left and right view

### 4.6.6 实验验证及结果分析

（1）试验结果

使用极限约束将特征点约束到同一水平极限上，然后再使用拟合得到的椭圆长轴进行匹配可以将隔水管端面的六个特征点一一匹配，如下图所示为使用极限约束与椭圆拟合后的长轴及中心坐标进行的双重约束得到的特征点匹配结果。

|  |
| --- |
|  |
| 图4-29 特征点匹配 |
| Fig.4-29 Feature point matching |

1. 极限约束精度分析

极线约束是一种将一个相机图形平面上的特征点约束到另一相机图像平面上的极限上的一种匹配方式，因此针对空间的一点在左右图像上的投影点的纵坐标理论值应该一致，但是由于光学器件等外界因素使得投影点有一定的误差，为了使最终定位精度得到保证，本课题使用17组不同位姿下的隔水管图片进行特征点检测并进行极限约束，约束后的左右图像上所检测到的隔水管法兰端面与管道连接的圆孔的纵坐标如下表所示，由于篇幅限制，列出部分数据在表格中，表中L、R分别代表左右图像，数字代表图像序号，序号代表该图像上的第几号椭圆。

表4-4 特征点极限约束纵坐标值

Tab.4-4 Eigenpoint limit constraint ordinate value

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号  图像 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| L1 | 566.702 | 694.777 | 694.488 | 874.99 | 941.288 | 949.842 |
| R1 | 566.569 | 694.982 | 694.1 | 875.081 | 941.029 | 949.796 |
| L2 | 569.702 | 697.777 | 697.488 | 877.99 | 944.288 | 952.842 |
| R2 | 569.569 | 697.982 | 697.1 | 878.081 | 944.029 | 952.796 |
| L3 | 570.702 | 698.777 | 698.488 | 878.99 | 945.288 | 953.842 |
| R3 | 570.569 | 698.982 | 698.1 | 879.081 | 945.029 | 953.796 |
| L4 | 571.702 | 699.777 | 699.488 | 879.99 | 946.288 | 954.842 |
| R4 | 571.569 | 699.982 | 699.1 | 880.081 | 946.029 | 954.796 |
| L5 | 576.702 | 704.777 | 704.488 | 884.99 | 951.288 | 959.842 |
| R5 | 576.569 | 704.982 | 704.1 | 885.081 | 951.029 | 959.796 |
| L6 | 577.702 | 705.777 | 705.488 | 885.99 | 952.288 | 960.842 |
| R6 | 577.569 | 705.982 | 705.1 | 886.081 | 952.029 | 960.796 |
| L7 | 578.702 | 706.777 | 706.488 | 886.99 | 953.288 | 961.842 |
| R7 | 578.569 | 706.982 | 706.1 | 887.081 | 953.029 | 961.796 |
| L8 | 579.702 | 707.777 | 707.488 | 887.99 | 954.288 | 962.842 |
| R8 | 579.569 | 707.982 | 707.1 | 888.081 | 954.029 | 962.796 |

将左右图像上极限约束后的特征点纵坐标进行绝对误差计算，由于数据较多因此用曲线图的方式进行表示，如下图所示为极限约束误差曲线图,极限约束绝对误差区间为：[-0.205,0.388]，绝对误差值的单位为：pixel，其绝对值平均误差为：0.0883pixel，在隔水管定位位姿检测中，该精度符合双目重建中匹配的要求。

|  |
| --- |
| 102.jpg |
| 图4-30 极限约束误差曲线图 |
| Fig.4-30 Limit error curve |

1. 附加约束匹配条件精度分析

本课题中的附加约束条件为拟合得到的椭圆长轴大小，其目的是为了区分处于同一极限上的两个误匹配点，达到隔水管法兰端面上特征点进行正确的一一匹配。由于在椭圆拟合以及拍摄角度等因素的影响，对于左右图像上同一个椭圆，拟合得到的椭圆长轴长度也不尽相同，存在一定的误差，为保证最终的检测精度，本节对附加约束匹配条件进行误差分析，同样使用17组不同位姿下的隔水管图片，对图片进行椭圆拟合得到如表3-4所示的长轴，表中L、R分别代表左右图像，数字代表图像序号，序号代表该图像上的第几号椭圆，由于篇幅限制，本节列出部分椭圆长轴数据，如下表所示：

表3-4 椭圆长轴数据表

Tab.3-4 Elliptic long axis data table

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号  图像 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| L1 | 39.0843 | 47.9901 | 27.1382 | 8.7483 | 44.9509 | 27.8721 |
| R1 | 39.321 | 47.9908 | 27.4528 | 8.53 | 44.8185 | 28.1066 |
| L2 | 39.0543 | 47.9601 | 27.1082 | 8.7183 | 44.9209 | 27.8421 |
| R2 | 39.291 | 47.9608 | 27.4228 | 8.5 | 44.7885 | 28.0766 |
| L3 | 39.0243 | 47.9301 | 27.0782 | 8.6883 | 44.8909 | 27.8121 |
| R3 | 39.261 | 47.9308 | 27.3928 | 8.47 | 44.7585 | 28.0466 |
| L4 | 39.0443 | 47.9501 | 27.0982 | 8.7083 | 44.9109 | 27.8321 |
| R4 | 39.281 | 47.9508 | 27.4128 | 8.49 | 44.7785 | 28.0666 |
| L5 | 39.0283 | 47.9341 | 27.0822 | 8.6923 | 44.8949 | 27.8161 |
| R5 | 39.265 | 47.9348 | 27.3968 | 8.474 | 44.7625 | 28.0506 |
| L6 | 39.0354 | 47.9412 | 27.0893 | 8.6994 | 44.902 | 27.8232 |
| R6 | 39.2721 | 47.9419 | 27.4039 | 8.4811 | 44.7696 | 28.0577 |
| L7 | 39.0074 | 47.9132 | 27.0613 | 8.6714 | 44.874 | 27.7952 |
| R7 | 39.2642 | 47.934 | 27.396 | 8.4732 | 44.7617 | 28.0498 |
| L8 | 39.0275 | 47.9333 | 27.0814 | 8.6915 | 44.8941 | 27.8153 |
| R8 | 39.2642 | 47.934 | 27.396 | 8.4732 | 44.7617 | 28.0498 |

对上诉表格进行绝对误差分析并以绝对误差曲线的形式表示，如下图所示为分析得到的绝对误差曲线图，从绝对误差曲线图可知，使用附加约束条件的椭圆的长轴约束得到的绝对误差区间为：[-0.3146,0.21251]，单位：pixel，其绝对值平均误差为0.0731pixel，在隔水管定位位姿检测中，该精度符合双目重建中匹配的要求。

|  |
| --- |
| tuoyuan.jpg |
| 图4-30 附加约束误差曲线图 |
| Fig.4-30 Additional constraint error graph |

## 本章小结

本章主要讲解了对于采集到的隔水管图像进行去噪的算法研究，通过试验对比分析了均值滤波、维纳滤波和自适应中值滤波方法三种滤波算法分别对隔水管图像去噪能力。针对隔水管图像中隔水管法兰端面ROI感兴趣区域的检测，本章分析比较了6种模板匹配算法。讲解了针对隔水管图像中隔水管法兰端面上与水管连接的孔洞边缘的分割，以及椭圆拟合方法的研究比较。最后，利用极限约束和本课题提出的附加约束匹配条件对特征点进行匹配约束，本章对本章的所有算法都进行了相应的对比性实验，并且进行了精度测试分析，结果证明本文所使用的方法的精度满足本课题的目标性研究。

# 目标定位与位姿确定

由于隔水管自身的形状不会发生，因此在目标定位与位姿确定过程中可以当成刚体。为了确定隔水管的位姿必须计算两个隔水管之间的一个坐标系变化的矩阵。对于这个矩阵的计算分为直接解析法以及向量法解析法。

直接解析法是直接将在隔水管图像上检测到的特征点进行直接位姿参数（R,T）解算。该方法存在一个很大的缺点，那就是计算出来的旋转矩阵R并没有旋转矩阵本应该拥有的正交性。

另一种方法是向量法，将隔水管法兰端面上拟合得到的三个不共线椭圆圆心特征点组成一个线性无关的向量组。并且将摄像机坐标系下对应的三个不共线的椭圆圆心以同样的顺序组成线性无关向量组。利用这两个线性无关的向量组求出两个隔水管之间的旋转矩阵，然后在根据旋转矩阵可以求平移向量。由于R、T矩阵并不能被运动控制平台解读，因此本课题使用欧拉角对姿态进行描述。

## 5.1位姿估计概述

由于可以将隔水管当做理想的刚体，通过刚体的长度、角度的不变性，可以通过与其固连的一个三维坐标系来描述它在空间中的位姿[36]。因此两个隔水管之间的转换运动可以看作如图5-1所示的两个不同三维坐标系之间的转换。

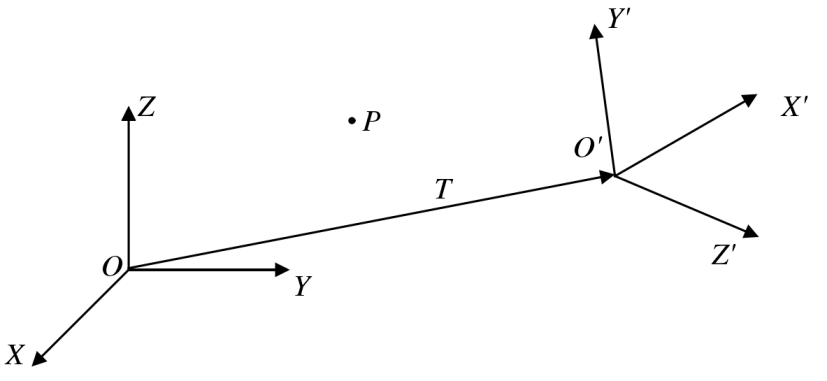


图5-1 欧式空间坐标变换

Fig.5-1 European space coordinate transformation

假设欧式空间里两坐标系分别为 和，P为空间中一点，且其在两个坐标系中的坐标分别为 和那么必然存在一个的正交矩阵R和一个的位移矩阵T ，满足：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-1） |

上式中R为坐标系旋转矩阵，其行列式值结果是1，并且该矩阵为一个正交性的矩阵，也就是说这个矩阵的逆等于这个矩阵的转置，注意，旋转矩阵R的旋转必须是绕着坐标系的原点进行的旋转。旋转矩阵中含有9个参数，不妨假设：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-2） |

根据旋转矩阵的特性，式(5-2)中9个元素满足如下六个约束条件：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

## 5.2欧拉角姿态描述法

5.1节中提出使用旋转矩阵R描述两个隔水管之间的旋转变换，但在实际情况下进行隔水管旋转矩阵的计算时需要9个未知数，这将导致计算量的大大增加。如图 4-3 所示，欧拉角使用三个角度变化量表示分别绕坐标系的三个坐标轴进行旋转的角度，具体的定义为：绕坐标系中x轴旋转的角度称为偏航角ψ；绕坐标系y轴旋转的角度称为俯仰角θ；绕坐标系z轴旋转的角度称为滚动角φ，本课题中将旋转的正方向规定为逆时针旋转。

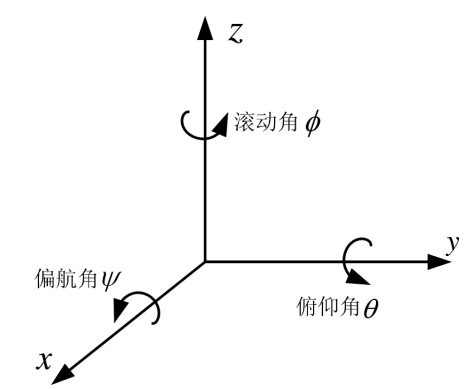


图5-2 欧拉角示意图

Fig.5-2 Euler angle sketch

假设一个坐标系在的前面为X轴，右边是Y轴，而上面的是Z轴。如图4-2所示。那么按照ZYX旋转的顺序，可以把空间中隔水管的旋转变成以下三个角度：

1. 绕物体的Z轴旋转，得到偏航角yaw；
2. 绕旋转之后的Y轴旋转，得到俯仰角pitch；
3. 绕旋转之后的X轴旋转，得到滚转角roll；

这个时候，我们可以将空间中的旋转表述为三维向量。其他的欧拉角亦是通过这种方式，把旋转分解到3个轴上，得到一个三维的向量，只不过选用的轴顺序不一样。这里介绍的rpy角是比较常用的一种，只有很少的欧拉角种类会有rpy这样脍炙人口的名字。

将围绕x，y，z轴围绕一个角度旋转的变换矩阵被定义为基本的变换矩阵，也就是：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-4） |
|  |  | （5-5） |
|  |  | （5-6） |

已知欧拉旋转角为采用ZYX 的轴向顺序，对应的旋转矩阵为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-7） |

将式(5-7)与式(5-2)对应起来可得到：

当时，有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-8） |

## 5.3 SVD位姿估计

如图5-3所示，位姿估计算法的流程包括6步。



图5-3位姿估计流程图

Fig.5-3 Relative pose estimation flow chart

利用前三章的知识，利用特征提取和双目立体匹配的方法，对摄像机坐标系统中的特征点坐标进行重构，完成前面4步。在已知特征点三维坐标的情况下，就可以求解两个隔水管之间的旋转关系与平移关系。假设隔水管处于位姿能够进行正确对接的位姿下，对其隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标是，隔水管处于检测位姿下，其隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标是，N是特征点的数目。根据式(5-1)这两个提取到的隔水管法兰端面的特征点集关系如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-9） |

对于每个特征点来说存在误差：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-10） |

位姿的确定可以对每个隔水管法兰端面提取到的特征点的平方误差之和最小化进行姿态参数（R，t）的计算，也就是式（5-11）方程的最小化。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-11） |

对于方程(5-11)的解本课题利用向量法，将隔水管处于位姿能够进行正确对接的位姿下，隔水管法兰端面上提取到的特征点中的三个不共线的特征点组成的一个向量组，以及隔水管处于检测位姿下，其隔水管法兰端面上提取到的特征点中三个不共线的特征点组成的相对应的向量组，然后用这两个向量组来做矩阵运算找到两个隔水管之间的旋转矩阵，然后通过旋转矩阵寻找平移向量。为了解决(5-11)最小化问题，本课题使用一种叫做奇异值分解法[37]的算法进行最小化。

首先，将隔水管处于位姿能够进行正确对接的位姿下，隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标和隔水管处于检测位姿下，其隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标转换为以重心为中心的坐标。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-12） |

将转换后的重心化坐标代入式(5-11)可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-13） |

可推出：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-14） |

此时，误差平方和目标函数变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-15） |

展开式(5-15)，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-16） |

因为，，式(5-16)中的第二项等于零。得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-17） |

当时，F取得最小值。此时有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-18） |
|  |  | （5-19） |

将式(5-19)展开，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-20） |

因为 R 为正交阵，以有，式(5-20)可转化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-21） |

在式(5-21)中，两项与R无关。因为F≥0，要使得F取最小值就必须使第三项取最大值。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-22） |

最大化目标函数D等价于目标函数F的最小化。

将式(5-22)重写如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-23） |

其中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-24） |

根据前面的推导，目标函数D的最大化等价于最小化目标函数f，因此，我们的目标是找到使目标最大化的R，在进一步讨论之前，首先证明以下定理：

对于任意正定矩阵和任意的归一化正交阵N ，如下的不等式成立：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-25） |

证明：令为矩阵 A 的第i列元素组成的向量，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-26） |

根据 Schwartz 不等式，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-27） |

故：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-28） |

证毕。

对矩阵B进行特征值分解并令。如果为归一化的正交阵。则矩阵是一个有正定性质的对称阵。根据以上推导的定理针对具有归一化的正交矩阵N存在性质：，那么，有如下关系存在：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （5-29） |

当我们给出了D函数的最大值之后。并且在找到R后，可通过(5-18)得到平移向量。

下面将求解姿态的奇异值分解方法，总结为5步：

1. 读取将隔水管处于位姿能够进行正确对接的位姿下，隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标和隔水管处于检测位姿下，其隔水管法兰端面上提取到的特征点坐标。
2. 按式(5-12)将、转换为重心化的坐标值。
3. 把重心的坐标代入方程（5-24）以找到矩阵B并执行奇异值分解。
4. 按式(5-29)求旋转矩阵 R。
5. 将计算得到两个位姿状态隔水管之间的旋转矩阵R之后，将得到的旋转矩阵R代入方程（5-18）可以计算得到平移向量t。

## 运动控制参数定义

在隔水管在线自动对接的过程中，由于摄像机相对于隔水管法兰端面的拍摄位置不发生改变，因此位移量和旋转量只需跟标准平面进行比较计算即可求得，其中标准平面为再人工将隔水管法兰端面与注水端法兰端面精确对齐时拍摄的平面。如图5-4所示建立全局坐标系，将坐标系原点建立在标定板图像的正中心处，x轴平行于标定板边框的同时y轴也平行于标定板边框，z轴则是垂直于标定板平面方向背向与标定板平面。由SVD位姿估计法可估计出标准平面与待检测平面之间的旋转矩阵R和平移矩阵T，再由式（4-8）即可得到旋转量的欧拉角姿态描述法。在隔水管对接过程中，由于控制运动设备将拍摄距离固定不变，因此只需要输出五个运动控制参数到运动控制中心即可对隔水管位姿进行调节到可精确对接状态，将该五个参数以向量形式给出为（）其中为位移估计量，其单位为：mm，为旋转估计量，其单位为：度（）。将位移估计量和旋转估计量以向量的形式输出到运动平台控制，注水端将做出相应的位移旋转运动，调整隔水管法兰端面与注水端法兰端面之间的相对位姿，最终将实现隔水管与注水端的在线自动对接。

图4-4 全局坐标系.tif

图5-4 全局坐标系示意图

Fig.5-4 Global coordinate system

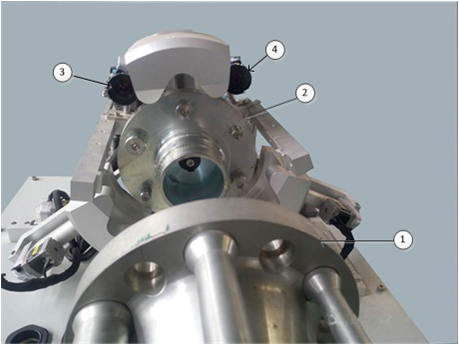
## 5.5 本章小结

然后介绍了旋转运动的常见表示方法：欧拉角表示，并描述了该方法与旋转矩阵的变换关系。在此基础上，引入了计算隔水管处于位姿能够进行正确对接的位姿下和隔水管处于检测位姿下之间的姿态估计的SVD分解算法。

# 6 双目视觉定位试验验证

## 6.1 硬件平台

为进一步验证系统和模型的可靠性和可行性，本文在实物试压台架上进行了现场验证实验，如图6-1所示。



1-隔水管 2-注水端法兰 3、4-双目相机

图6-1 隔水管位姿检测试验平台

Fig.6-1Riser position detection test platform

在现场做实验时，采用的检测设备包括：两个摄像机、两个光学镜头、图像采集卡、计算机和标定板。本课题中双目摄像机之间的基线距离设置为15cm，完成对隔水管图像的数据采集，并在离线状态下采集一组标定板图像用于摄像机标定。对于本课题中用于搭建硬件平台的设备的具体参数如下：

#### （1） 工业相机

在本课题中，使用工业摄像机进行隔水管图像的拍摄。因为普通相机抓拍快速运动的物体非常模糊，所以采用工业相机进行图像的采集，本课题选择大恒公司型号为MER-131-75GM-P的水星系列相机，具体的工业相机参数型号如下表所示：



图6-2 工业相机

Fig.6-2 industrial camera

该相机的参数表如下表所示：

表6-1 工业相机参数表

Tab.6-1 Industrial camera parameters table

|  |  |
| --- | --- |
| 型号 | MER-131-75GM-P |
| 分辨率 | 1280(H)x1024(V) |
| 帧率 | 75fps |
| 传感器类型 | CMOS |
| 像元尺寸 | 4.8umx4.8um |
| 光谱 | 黑白 |
| 图像数据格式 | Mono8/Mono10 |
| 数据接口 | 快速以太网(100Mbit/s)或千兆以太网(1000Mbit/s) |
| 功耗 | <3W(@12V DC),<3.75W@PoE |
| 镜头接口 | C口 |
| 机械尺寸 | 38.3mmx29mmx29mm(不含C接口) |
| 工作温度 |  |
| 工作湿度 | 10%~80% |
| 重量 | 75g |
| 光谱认证 | RoHS,CE,GigE Vision,GeniCam |

#### （2） 工业镜头

另外，根据所选相机还需确定镜头的参数与型号，本课题中实验平台上拍摄距离为50cm，被测物尺寸为Φ25cm，上诉工业相机的传感器靶面为1/2英寸，因此，为了将所有的物体都拍摄到，视图的场应该计算出目标的短边的长度。经过对视场角最小角的计算，得到视场角需要28º才能把隔水管法兰端面拍完整，由下述公式可计算镜头所需的焦距必须小于9.6mm。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6-1） |

在上面的公式中，f:为工业相机的焦距，单位为mm，V：隔水管法兰端面在垂直方向上的高度，H：隔水管法兰端面在水平方向上的长度，D：工业镜头和隔水管法兰端面之间的距离，V：相机所拍摄的隔水管图像垂直方向上像素点个数，H：相机所拍摄的隔水管图像水平方向上像素点个数。因为相机的接口是C接口，因此镜头的接口也必须为C接口，由此本课题选择使用日本CBC集团公司提供的computer型号为H0514-MP2的镜头。



图6-3 工业镜头

Fig.6-3 Industrial lens

该镜头的参数表如下表所示：

表6-2 工业镜头参数表

Tab.6-2 Industrial lens parameters table

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 型号 | | H0514-MP2 |
| 靶面尺寸 | |  |
| 焦距(mm) | | 5 |
| 最大成像尺寸(mm) | | 6.4x4.8(8) |
| 光圈范围(F-Stop) | | F1.4~F16C |
| 工作距离(m) | | 0.1~0.9 |
| 控制 | 光圈 | 手动 |
| 聚焦 | 手动 |
| 最小物距时视场范围(H x V) |  | - |
|  | 15.0 x 11.1 |
| 视场角  (D x V x ) |  | - |
|  | 76.7x65.5x51.4 |
|  | 62.3x51.4x39.5 |
| 变形率 |  | - |
|  | -0.48%(y=4.0) |
|  | -2.26%(y=3.0) |
| 后焦距(mm) | | 10.8 |
| 接口 | | C- |
| 滤镜螺纹(mm) | | M43xP0.75 |
| 尺寸(mm) | | 44.5x45.5 |
| 重量(g) | | 102 |
| 工作温度() | | -10~+50 |

#### （3） 标定板

本课题中使用深圳市圆点视觉科技有限公司生产的型号为：HC-80-7x7-7.6-3.75-1.0的标定板，该标定板标靶为激光直接光刻板，图案尺寸位置公差在1μm以内，标定板图案尺寸60X60mm，49个圆点，圆心距7.5mm，圆直径3.75mm，陶瓷板厚度1mm，可满足摄像机标定的精度需求。

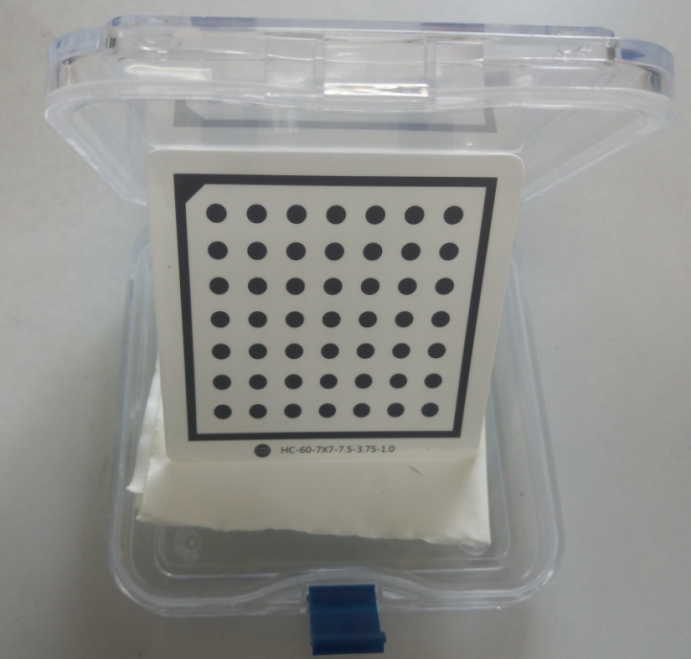


图6-4标定板

Fig.6-4 Calibration board

#### （4） 图像采集卡

为了满足隔水管图像采集及传输到电脑进行处理的需求，采用型号为MV-EGigE Dual的图像采集卡。

#### （5） 计算机

视觉图像处理器选用 Intel(R)Xeon(R)CPU L5640 @2.27GHz 2.26 GHz，六核十二线程，内存16G。

## 6.2 软件设计与系统测试

本系统在模拟的隔水管检验检测平台上使用双目摄像机完成隔水管图像采集，采用Microsoft Visual Studio 2010进行软件系统的编写，在编写对隔水管的双目视觉定位过程中使用halcon13库的函数，本课题所设计的软件可以在Windows7旗舰版系统上流畅的运行。隔水管双目视觉定位测量的软件界面使用C#语言编写，界面如下图所示，隔水管双目视觉定位测量界面分为标定模块、检测模块、图像显示模块和数据显示模块四个模块组成。

|  |
| --- |
| 图片1 |
| 图6-5软件操作系统 |
| Fig.6-5 Software operating system |

（1）标定模块：启动该系统时进行，在双目相机之间产生相对移动或操作不当时需重新进行标定外，整个系统只需要进行一次标定即可开始进行检测，该模块主要是进行系统中双目相机之间的标定，以及全局坐标系的标定，其中双目标定步数应该选择在9~16步之间，能够使标定精度达到最高。

（2）检测模块：包含针对隔水管法兰端面ROI区域的检测、隔水管法兰端面与水管连接的孔洞的椭圆边缘检测和椭圆拟合、以及左右隔水管图像上特征点之间的匹配、特征点的三维重建和隔水管之间的位姿估计。

（3）图像显示模块：包含两个窗口用于显示双目摄像机拍摄到的隔水管法兰端面的图像，并且实时显示系统当前正在处理的图像以及处理的数据结果。

（4）数据显示模块：实时显示得到的双目相机标定数据以及使用双目视觉定位技术对隔水管的位姿进行估计得到的位姿数据。

首次启动本双目视觉定位检测系统需对系统中的摄像机和全局坐标进行标定。其中双目标定是在进行11步标定之后产生的标定结果，标定得到的数据包括：焦距、像元尺寸、畸变系数、图像坐标原点、双目相机图像的分辨率，标定的数据结果显示在数据显示模块如下图所示：

|  |
| --- |
|  |
| 图6-6 双目相机标定 |
| Fig.6-6 Binocular camera calibration |

全局标定为标定相机到固定在轨道旁的标定板的旋转平移矩阵，全局坐标系的作用是将所有检测到的定位数据都转换到一个不发生相对移动的固定坐标系上，其目的是建立视觉坐标系与控制运动坐标系的统一。

|  |
| --- |
|  |
| 图6-7 全局坐标系标定 |
| Fig.6-7 Global coordinate system calibration |

如图6-8所示为极限约束后的效果图，其目的是将左右图像的同一匹配点约束在同一极限上，也就是映射到点与线的匹配对应关系。

|  |
| --- |
|  |
| 图6-9 左右图像极限约束 |
| Fig.6-9 Left and right image limit constraints |

图6-10所示为隔水管位姿中平行度的检测，也就是判断两对接端面是否平行，如果不平行则进行平行度的调整，则输出对应的旋转参数到运动控制系统对注水端的平行度进行调整，直到调整到两端面平行为止，对中位姿包含X轴向的旋转和Y轴向的旋转，旋转的单位为（度）。

|  |
| --- |
|  |
| 图6-10 平行度位姿检测结果 |
| Fig.6-10 Parallelism detection result |

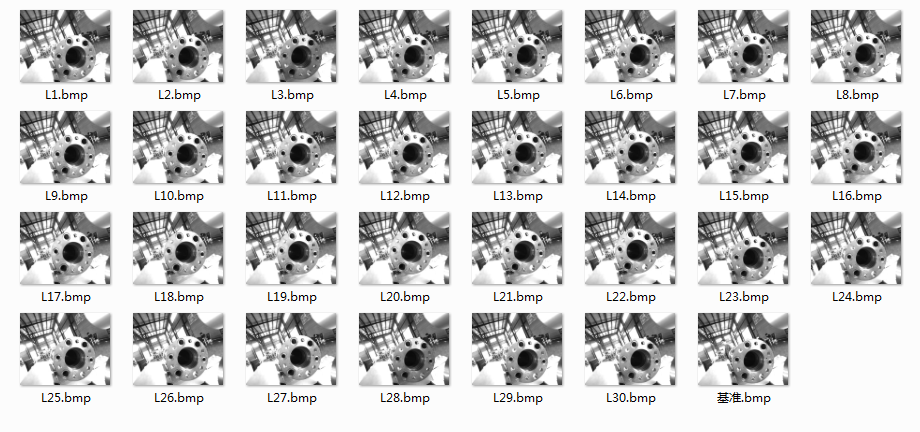
图6-11为姿态检测中的对中位姿检测，该检测在平行度检测之后，对中位姿包含X轴向与Y轴向的移动以及Z轴向上的旋转，移动单位为（mm），旋转单位为（度）。

|  |
| --- |
|  |
| 图6-11 对中位姿检测结果 |
| Fig.6-11 Detection of medium pose result |

## 6.3 精度测试

为了检测本课题所设计的隔水管双目视觉定位技术的测量精度，在隔水管检验检测装置上加装双目视觉系统进行视觉检测。隔水管检验检测装置上的运动控制平台对注水端法兰端面存在五个自由度分别为隔水管旋转移动存在的三个自由度和隔水管位移移动存在x轴和y轴方向上的两个自由度，对隔水管存在一个y轴方向上的移动的自由度，运动控制平台能够精确定量控制隔水管的移动，因此本课题利用运动控制平台将隔水管进行定量移动并拍摄30组隔水管，使用图6-1隔水管位姿检测试验平台进行检测，首先拍摄隔水管在三十个不同位姿下的图片并记录下这三十个位姿，如下图所示:

|  |
| --- |
|  |
| 图6-12右相机测试图片 |
| Fig.6-12 Right camera test picture |



|  |
| --- |
|  |
| 图6-13左相机测试图片 |
| Fig.6-13 Left camera test picture |

将上述所拍摄的隔水管图像进行位姿检测并记录下检测到的位姿，然后将该位姿与拍摄时所记录的位姿进行比较，如下表所示为记录的x轴向上和y轴向上移动估计量：、，旋转估计量：偏航角（Ψ）、俯仰角（θ）、滚动角（Φ）的真值和测试值的部分数据：

表6-3 测试结果表

Tab.6-3 Test results table

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 位移估计量(毫米) | | 旋转估计量（º） | | |
|  |  | 偏航角（Ψ） | 俯仰角（θ） | 滚动角（Φ） |
| 真值 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 测试值 | 0.1576 | 0.2074 | 0.1766 | 0.1266 | 0.1772 |
| 真值 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 测试值 | 2.1288 | 2.1068 | 1.1648 | 0.8471 | 1.1557 |
| 真值 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| 测试值 | 3.9311 | 3.8952 | 2.0557 | 1.9149 | 1.9161 |
| 真值 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 |
| 测试值 | 6.0559 | 5.9083 | 3.1534 | 2.9328 | 2.9332 |
| 真值 | 8 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| 测试值 | 7.9233 | 8.0763 | 3.9423 | 3.9683 | 4.0522 |
| 真值 | 10 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| 测试值 | 9.9492 | 10.0498 | 4.941 | 5.0285 | 4.9505 |
| 真值 | 12 | 12 | 6 | 6 | 6 |
| 测试值 | 12.1077 | 11.9402 | 6.0850 | 5.9383 | 5.9376 |
| 真值 | 14 | 14 | 7 | 7 | 7 |
| 测试值 | 13.9192 | 14.9455 | 6.9012 | 6.9198 | 6.9207 |
| 真值 | 16 | 16 | 8 | 8 | 8 |
| 测试值 | 15.8655 | 16.0711 | 7.8374 | 8.1439 | 7.8504 |
| 真值 | 18 | 18 | 9 | 9 | 9 |
| 测试值 | 17.8572 | 18.0840 | 8.7825 | 9.1476 | 9.1430 |

将上述表格中的数据进行分析，得到如图6-14所示的绝对误差曲线图:

|  |
| --- |
| untitled.tif |
| 图6-14绝对误差曲线图 |
| Fig.6-14 Absolute error curve |

从绝对误差曲线可以看出使用本文的检测方法对隔水管位姿进行检测，检测得到的绝对误差范围为：[0.02,0.23]，单位：mm，将上诉绝对误差进行再一次的平均误差和均方差分析，如下表所示为计算得到的平均误差与均方差，根据分析可知平移估计量的平均误差为0.1160mm，均方差为0.044mm，满足系统对移动估计量的要求的0.3mm机械安装公差，旋转估计量的平均误差为0.1309mm，均方差为0.0495mm，满足隔水换检验检测系统过程中对接过程中对旋转估计量的目标要求的0.2º。

表6-4 误差分析表

Tab.6-4 Error analysis table

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 估计偏移量名称 | Tx | Ty | 偏航角（Ψ） | 俯仰角（θ） | 滚动角（Φ） |
| 平均误差 | 0.1214 | 0.1107 | 0.1403 | 0.1227 | 0.1299 |
| 均方差 | 0.0445 | 0.0438 | 0.0489 | 0.0507 | 0.0491 |

基于双目视觉定位检测是一个复杂的系统，分析对使用双目视觉定位技术产生误差影响因素，为今后希望改进该系统给出了一定的指导作用。基于双目视觉定位技术的隔水管检验检测装置上对接过程中的误差主要来自以下几个方面：

1、相机的有限分辨率，使测量结果更加精确，应该使用分辨高的相机，这将增加一定的成本。

2、图像处理误差。图像处理算法在很大程度上影响了测量结果的准确性，如标定板圆心提取、亚像素边缘线提取等。摄像机所获得的图像将不可避免的会受到噪声，背景光干扰等因素影响，此外，算法的缺陷也会导致误差。

3、标定误差。在进行摄像机标定时，可能存在图像采集方式不正确带来的误差，另外标定算法自身也存在一定的误差，并且这种误差只能做到将其尽量减小。

## 6.4 本章小结

本章在隔水管位姿检测试验平台上搭建了双目视觉检测系统以及所使用的设备的规格参数，设计了系统的软件框架，对整个双目视觉定位技术过程进行了阐述，并对系统的关键部分进行了相应的试验测试和结果分析。

# 7 总结与展望

## 7.1 论文工作总结

本课题以某石油公司出厂检验需求为背景，基于双目视觉定位技术，阐述了基于自动对接系统的国内外研究现状和双目视觉定位的国内外研究现状，提出了系统的双目视觉定位技术的整体实现方案。主要包括以下几方面工作：

（1）对国内外相关自动对接系统文献和双目视觉指导下的对接系统做了深入分析，对隔水管检验检测装置进行详细调研，对隔水管的对接过程进行充分了解。

（2）根据隔水管检验检测装置对接过程中的技术目标，提出了双目视觉定位技术的总体方案。

（3）详细介绍了双目视觉测量模型中各个坐标系之间的相互转换，对隔水管检验检测装置上所使用的双目摄像机进行标定。基于张正友标定法，完成摄像机内参的标定以及全局坐标系的标定，找到隔水管位姿到全局坐标系下的转换关系。

（4）对隔水管法兰端面圆孔的提取方法进行了详细的研究，并分析了其存在的不足和有待改进的地方，由于对实时在线检测的要求很高，首先使用模板匹配算法对隔水管法兰端面进行定位，然后采用亚像素阈值分割对隔水管法兰端面圆孔边缘进行提取。

（5）通过双目视觉重建技术，完成隔水管法兰端面圆孔圆心重建，然后对重建的圆孔圆心进行位姿描述。

（6）在隔水管检验检测装置上搭建双目视觉检测系统，以及相应硬件设备的选型，以及进行最终的系统检测并对系统检测的精度加以分析。

## 未来工作展望

由于时间和研究水平等方面的限制，本文虽然基本完成了隔水管位姿定位检测系统关键技术的实现，并取得了一定的成果，但要正真应用到实际的隔水管检测检测过程中的隔水管对接过程还有一段距离，还需要进行以下改进：

本文中的所有实验都是在模拟实验平台上进行的，而在隔水管实际检测现场，环境恶劣，外界环境光的干扰以及震动等因素都会对检测系统产生很大影响，由本系统的测量原理可知，震动会导致图像采集系统和隔水管的相对拍摄距离发生瞬间改变，导致位姿信息提取不准确。所以应该进一步研究在强干扰光作用下的隔水管法兰端面圆孔提取算法以及设计合理的机械结构以便进一步加强抗振性能。

# 致 谢

时光如梭，三年的研究生求学生活即将结束，回首在西南科技大学的这三年时光，心中充满无限感激和留恋之情。在这里，我遇到了我的良师，我的益友。在这里，我收获了成长，为自己的未来定下了方向。值此毕业设计完成之际，我要对那些引导过我、帮助过我、激励过我、陪伴过我的老师和同学致以最诚挚的谢意。

首先，我要特别感谢我的导师刘桂华教授。在攻读硕士的三年时间里，刘老师在学习和生活上给了我很多帮助，在她的悉心指导和全力支持下，我才能顺利完成本文的一系列工作。刘老师平易近人、治学严谨、看待问题有自己独特的见解，总是在我感到迷茫困惑时给予我建议和坚定脚步的信心，像朋友一样和我探讨课题研究方向、论文完成过程中遇到的困难以及未来发展方向。刘老师在科研和学术上的远见卓识让我由衷佩服，更让我受益匪浅。我在学习和生活上的每一点成长，都蕴含了刘老师大量的心血和精力，在此我要向刘老师表示我最真挚的感谢。

还要感谢张华教授，张老师高瞻远瞩的目光和缜密的思路让我受益良多。张老师总能看到问题的本质，时刻教导我们要以一种长远的眼光看待事情，要具有辩解的思维，不能拘泥于局部。从张老师的身上，我学到了分析问题的方法和辩证看待问题的习惯。

感谢特种机器人实验室团队的每一位老师，谢谢你们三年里对我的指导和影响。感谢已经毕业的张丽萍、丁飞、陈林宇、高军强等师兄师姐，谢谢你们在生活和学习上给予我的帮助和关怀。感谢王静强、康含玉、牛乾、王曼、吴倩、赵碧霞、游斌相等同学三年来的陪伴和帮助，谢谢你们与我分享喜怒哀乐，与你们在一起的日子我感到很快乐很充实。感谢实验室包川、杨康、邓豪、邓鑫、曾维林、周飞、杜超等师弟师妹，谢谢你们为我的研究生生活增添无限的色彩。感谢控制工程专业的所有伙伴们，和你们一起玩耍学习的时光弥足珍贵！

感谢家人对我的全力支持和无微不至的关怀，有你们我才能走到今天。感谢所有的朋友们，谢谢你们的陪伴，让我在成长道路上不孤单！

最后由衷感谢审阅本文以及百忙中参加论文答辩并提出宝贵意见的专家学者！

**参考文献**

[1] Ji Y. Surgical Navigation for Accurate Treatment of Cancer[C]//2015中国（南京）国际生物医药创新与合作大会暨第六届国际dna和基因组活动周——2015第八届国际工业生物技术大会会刊, 2015.

[2] 于桂君,习重华. 机器视觉应用于混凝土加料的对接定位方法[J]. 工业控制计算机, 2005(5): 59-60.

[3] Xijun wang1 SS2IOOFMAPCAOSDNR31P,2.graduate university of the chinese academy of sciences 1B1P. Laser Processing Modeling and Parameter Calculating in Laser Cladding Silicon Coatings[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Frontiers of Laser Processing(icfl), 2011.

[4] 范鹏飞. 海洋深水钻井隔水管系统力学特征及施工参数优化研究[D]: 西南石油大学, 2016.

[5] Tadini P.,Tancredi U.,Grassi M.,等. Active debris multi-removal mission concept based on hybrid propulsion[J]. Acta Astronautica, 2014, 103: 26-35.

[6] Xu H. Wigbert Fehse, Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft, Cambridge University Press, Cambridge, Isbn: 0-521-82492-3, 2003 (price: $ 120, Pp. 495)[J]. Automatica, 2005, 41(7).

[7] 沈子琦,王召巴. 基于图像处理的喷管装配对准方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008(2): 151-154.

[8] 田娜,庞师军,卫晓冲. 视觉系统在硅片检测上的应用[J]. 电子工艺技术, 2010(5): 303-305.

[9] 淳静. 光纤有源器件激光焊接封装的关键技术研究[D]: 国防科学技术大学, 2006.

[10] Li Ye,Jiang Yanqing,Cao Jian,等. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 163-173.

[11] 王振兴. 船舶曲板成形双目立体视觉在位检测技术研究[D]: 上海交通大学, 2015.

[12] 张学贺. 基于双目视觉的六足机器人环境地图构建及运动规划研究[D]: 哈尔滨工业大学, 2016.

[13] 高庆吉,洪炳熔,阮玉峰. 基于双目协调的小型全自主足球机器人导航[J]. 机器人, 2003(6): 505-511, 520.

[14] 严鑫. 基于散焦技术的光栅三维测量方法研究[D]: 江苏科技大学, 2015.

[15] 吴雅君. 多尺度正弦光栅投影扫描测量的研究[D]: 湖北工业大学, 2016.

[16] 张声浩. 双目CCD光电成像测量系统研究[D]: 南京理工大学, 2008.

[17] Olson,C.f.,Abi-rached,等. Wide-baseline stereo vision for Mars rovers[C]//Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, 2003: 1302-1307.

[18] 方超. 双目CCD成像目标器识别算法研究[D]: 南京理工大学, 2007.

[19] Bennink RJ,Montfrans CV,Jonge WJD, et al. Imaging of Intestinal Lymphocyte Homing By Means of Pinhole Spect in a Tnbs Colitis Mouse Model[J]. Nuclear Medicine and Biology, 2004, 31(1).

[20] 曹慧. 基于激光双目视觉系统的接缝三维重建[D]: 南京理工大学, 2004.

[21] 王瑞岩. 计算机视觉中相机标定及点云配准技术研究[D]: 西安电子科技大学, 2015.

[22] 董圣男. 基于双目立体视觉的空间非合作目标的位姿测量[D]: 南京航空航天大学, 2010.

[23] Ye Q,Dong J,Zhang Y. 3d Human Behavior Recognition Based on Binocular Vision and Face–hand Feature[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(23).

[24] 范向阳. 图像感兴趣区域提取方法研究[D]: 南京邮电大学, 2017.

[25] 汪辉. 图像分割及其感兴趣区域提取方法的研究[D]: 安庆师范大学, 2017.

[26] 荆鑫. 基于模板匹配的视觉分拣方法及应用研究[D]: 哈尔滨工业大学, 2017.

[27] Cockshott WP. A Hybrid Vector Quantizer for Enhanced Image Pyramid Coding with Application to Volumetric Image Compression in Confocal Microscopy[C]//Proceedings of Photonics Asia 2004:information Processing and Data Storage——5637volume, 2004.

[28] 陈恺,陈芳,戴敏,等. 基于萤火虫算法的二维熵多阈值快速图像分割[J]. 光学精密工程, 2014(2): 517-523.

[29] 管慧娟. 基于区域的图像分割方法[D]: 大连理工大学, 2006.

[30] 赵洛彬,杨瑞峰,郭晨霞. 靶标特征点提取亚像素精度阈值分割算法研究[J]. 中国科技论文, 2015(8): 942-947.

[31] 刘淑琴. 图像特征提取方法及其应用研究[D]: 西北大学, 2016.

[32] 王万国,王仕荣,徐正飞,等. 基于边界的最小二乘椭圆拟合改进算法[J]. 计算机技术与发展, 2013(4): 67-70.

[33] X.r.wang,Y.ding. An Image Registration Algorithm Based on Fourier-mellin Transform and Feature Point Matching[C]//Proceedings of the International Conference on Multimedia, Communication and Computing Application（mcca 2014）, 2014.

[34] Guo yongfang yu ming sun yicai hebei university of technology tianjin C. Study on an Improved Robust Algorithm for Feature Point Matching[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Circuit and Signal Processing & 2010 Second Iita International Joint Conference on Artificial Intelligence(volume 3), 2010.

[35] Liu R,Peng D,Liu Y. Research and Implementation of Image Feature Point Matching Method Based on Opencv[C]//Proceedings of 2016 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics(ameii 2016), 2016.

[36] Ackermann U,Eschbaumer S,Bergmaier A, et al. Position and Time Resolution Measurements with a Microchannel Plate Image Intensifier: a Comparison of Monolithic and Pixelated Cebr 3 Scintillators[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, a, 2016, 823.

[37] 李金岭. SVD算法简介与模拟数据检验[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1998(00): 16-21.

# 攻读硕士学位期间发表的学术论文及其研究成果

学术论文及研究成果：

1. 刘桂华, 王玉玫, 张华等.一种基于机器视觉的深水钻井隔水管自动对接位姿检测方法:CN201710110455.2[P].2017-06-23.

参与项目：

[1] 基于机器视觉的钢轨表面缺陷检测；

[2] 隔水管在线自动对接检测。