



## 蒸汽发生器传热管检测机器人视觉定位方法

李嘉玮, 刘招金, 李玉晓, 陈建, 顾欣, 张国成, 王刚

引用本文:

李嘉玮, 刘招金, 李玉晓, 等. 蒸汽发生器传热管检测机器人视觉定位方法[J]. *智能系统学报*, 2026, 21(2): 453-460.

LI Jiawei, LIU Zhaojin, LI Yuxiao, et al. Visual localization method for steam generator heat transfer tube inspection robot[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2026, 21(2): 453-460.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202508029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 舰载机位姿实时视觉测量算法研究

Research on real-time vision measurement algorithm of shipborne aircraft pose  
*智能系统学报*. 2021, 16(6): 1045-1055 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202103014>

### 工业机器人加工轨迹双目3D激光扫描成像修正方法

Binocular 3D laser scanning imaging-based industrial robot machining trajectory correction method  
*智能系统学报*. 2021, 16(4): 690-698 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202008008>

### 改进Center-Net网络的自主喷涂机器人室内窗户检测

Indoor window detection of autonomous spraying robot based on improved CenterNet network  
*智能系统学报*. 2021, 16(3): 425-432 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202005016>

### 基于迁移学习的移动机器人单帧图像坡度检测算法

Single frame image slope detection algorithm for mobile robots based on transfer learning  
*智能系统学报*. 2021, 16(1): 81-91 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202009009>

### 基于力传感的系留无人机定位方法研究

Research on the positioning method of tethered UAV using force sensing  
*智能系统学报*. 2020, 15(4): 672-678 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201907015>

### 音频感知哈希闭环检测的无人机仿生声呐SLAM算法研究

Research on BATSLAM algorithm for UAV based on audio perceptual hash closed-loop detection  
*智能系统学报*. 2019, 14(2): 338-345 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201708018>

DOI: 10.11992/tis.202508029

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.tp.20251211.1424.004>

# 蒸汽发生器传热管检测机器人视觉定位方法

李嘉玮<sup>1</sup>, 刘招金<sup>1</sup>, 李玉晓<sup>1</sup>, 陈建<sup>2</sup>, 顾欣<sup>2</sup>, 张国成<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 智能海洋航行器技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中广核检测技术有限公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 蒸汽发生器传热管是核电系统的关键部件, 需要定期检查以确保安全。针对现有传热管检测机器人自主定位能力不足的问题, 本文提出了一种基于 ArUco 标记的传热管检测机器人自主定位方法。该方法根据任务环境特点, 将 ArUco 标记及摄像头分别布置在机器人腿部和水室底部, 从而增强了定位的鲁棒性和持续性; 此外, 本文结合管板先验信息, 提出了动态摄像机外参更新方法, 提高了机器人气动锚爪的定位精度; 最后, 通过气动锚爪位置修正策略, 精准判断气动锚爪所插入传热管序号。在蒸汽发生器水室模拟体中的试验表明, 该方法具有更好的定位精度, 气动锚爪最大定位误差仅为 6.75 mm (降低约 42.99%)。本研究可为核电智能检测装备的研发以及狭小密闭空间下的机器人视觉定位提供技术参考。

**关键词:** 蒸汽发生器; 传热管检测; 机器人; 水室; 锚爪; ArUco 标记; 视觉定位; 摄像机外参

**中图分类号:** TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)02-0453-08

中文引用格式: 李嘉玮, 刘招金, 李玉晓, 等. 蒸汽发生器传热管检测机器人视觉定位方法 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(2): 453-460.

英文引用格式: LI Jiawei, LIU Zhaojin, LI Yuxiao, et al. Visual localization method for steam generator heat transfer tube inspection robot [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(2): 453-460.

## Visual localization method for steam generator heat transfer tube inspection robot

LI Jiawei<sup>1</sup>, LIU Zhaojin<sup>1</sup>, LI Yuxiao<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, GU Xin<sup>2</sup>, ZHANG Guocheng<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Autonomous Marine Vehicle Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. CGNPC Inspection Technology Co., Ltd, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** The heat transfer tubes in steam generators are critical components of nuclear power systems and require regular inspection to ensure safety. To address the insufficient autonomous positioning capability of existing heat transfer tube inspection robots, this study proposes an autonomous positioning method based on ArUco markers. Given the task's environmental characteristics, this method deploys ArUco markers on the robot's legs and a camera at the bottom of the water chamber, thereby enhancing the robustness and continuity of positioning. Furthermore, by incorporating prior information about the tube sheet, a dynamic method for updating the extrinsic camera parameters is introduced to improve the positioning accuracy of the robot's pneumatic anchor claws. Finally, through a position correction strategy for the pneumatic anchor claws, the serial numbers of the heat transfer tubes into which the claws are inserted can be accurately identified. Tests conducted by simulating the steam generator in a water chamber demonstrate that the proposed method achieves superior positioning accuracy, with a maximum positioning error of only 6.75 mm for the pneumatic anchor claws (a reduction of approximately 42.99%). This research provides a technical reference for the development of intelligent inspection equipment for nuclear power plants and visual positioning of robots in narrow, confined spaces.

**Keywords:** steam generators; heat transfer tube inspection; robot; water chamber; anchor claws; ArUco mark; visual positioning; camera extrinsic parameters

核能作为重要的清洁能源, 兼具低碳排放、安全可靠和能量密度高的显著优势, 在支撑全球能源转型和经济社会发展中发挥着关键作用<sup>[1-2]</sup>。在核电站系统架构中, 蒸汽发生器作为连接一、二

回路的核心设备, 其管板组件与倒置 U 形传热管束共同构成了核反应堆主回路压力边界的重要组成部分, 需要定期检测以确保核电系统的安全<sup>[3-4]</sup>。人工检测存在辐射暴露风险与检测效率瓶颈问题, 因此检测过程需要在蒸汽发生器的水室中部署远程操控的机器人, 机器人爬行到指定位置并旋转检测臂将涡流探头引导装置与 U 形传热管

收稿日期: 2025-08-25. 网络出版日期: 2025-12-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52471318).

通信作者: 王刚. E-mail: [wanggang@hrbeu.edu.cn](mailto:wanggang@hrbeu.edu.cn).

轴向精确对位,最后使用高速探头推拔系统将涡流探头插入U形传热管中进行检查<sup>[5-7]</sup>。

在传热管的自动化检测过程中,机器人精确定位是保障检测可靠性的关键技术问题。由于管板表面存在5000~10000个呈正三角形或正方形排列的管孔<sup>[8]</sup>(间距22~25 mm,与传热管相连),检测机器人作业时可能因位置偏差导致探头错检、漏检或机械臂与水室内壁碰撞等问题,这些情况出现将会影响检测效率以及检测结果的可靠性,因此必须定时对检测机器人在管板上的位置进行核对。传统机器人定位手段通过布置于水室内部的摄像头实时采集机器人作业图像,经视频传输系统将画面呈现在控制终端,操作人员需通过人工视觉比对机器人物理位置与控制系统位置的匹配性<sup>[9]</sup>。由于管板上管孔众多且密集形成了高密度视觉特征,人工目视识别存在显著的空间辨识困难,造成核对效率低下,单次核对用时需3~4 min。高效的传热管检测机器人自主定位方法可以有效减轻工作人员的负担,并且在保证检测过程安全的同时有效地提高检测效率。

常见的机器人定位技术有全球定位系统(global positioning system, GPS)、同步定位与地图创建(simultaneous localization and mapping, SLAM)和无线通讯定位技术等<sup>[10-13]</sup>,在蒸汽发生器水室这一特殊室内环境中均面临严峻挑战。水室为室内密闭空间且为钢材制成,GPS信号无法穿透,因此无法采用GPS进行传热管检测机器人可靠定位<sup>[14]</sup>。在各种室内定位技术中,基于激光雷达的SLAM方法<sup>[15]</sup>虽然无需预先部署信标,但其成本昂贵,且在水室这种特征稀疏(主要为重复性管孔图案)且结构对称的环境中,容易发生定位退化,可靠性不足。基于无线通信技术定位方法,例如基于Wi-Fi的室内定位系统<sup>[16]</sup>具有成本较低和易于部署的优点,但其难以满足毫米级精度的定位需求。近年来,基于标记的单目视觉定位方法因其成本低、摄像机布置及标定过程简单、定位精度高等优势,在机器人的室内定位跟踪、目标检测等场景中有着广泛的应用<sup>[17-19]</sup>。由于传热管检测在核电站停堆期间进行,水室内辐射水平已显著降低,并且密闭环境的人工光源照明稳定、无外界复杂光源干扰,因此,基于标记的单目视觉定位方法在本任务中具备高度的可靠性。单目视觉定位方法通过找到真实世界坐标系与图像坐标系中的对应特征点,并根据特征点的坐标来解决透视 $n$ 点(perspective- $n$ -point, PnP)问题。然后通过齐次矩阵获得物体的姿态和位姿信息<sup>[20]</sup>。

由于使用任意图像作为特征时计算成本变得过高,因此通常采用基准标记来提取合适的特征点,如Toolkit、ARTag、AprilTag等基准标记<sup>[21-23]</sup>。

Garrido-jurado等<sup>[24]</sup>提出了ArUco标记,由于其定位精度高、鲁棒性强并且标记检测时间短,近年来被广泛应用。Marut等<sup>[25]</sup>在无人机着陆过程中使用ArUco标记作为参考点。通过使用标记位姿估计算法,可以高精度地确定着陆期间飞行器的高度。在60 m范围内,校正后的距离误差小于10%。Chinchilla等<sup>[26]</sup>使用改进了材料以及白边宽度的ArUco标记与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)数据相融合构建了用于半结构化环境的自主对接系统,对接误差小于31.3 mm。Xu等<sup>[27]</sup>提出了一种基于多个ArUco标记的水下视觉导航方法,并开发了单个标记位姿估计的噪声模型及多标记最优算法,实现了水下航行器的精准定位。Zheng等<sup>[28]</sup>将ArUco标志物应用于变电站巡检机器人的定位,并将扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法用于融合定位信息数据。结果表明,基于ArUco标记的EKF定位可以有效地解决定位问题。Irfan等<sup>[29]</sup>在使用机器人操作系统(robot operating system, ROS)和Gazebo的模拟环境中使用3D摄像机,将ArUco标记用作路径检测和引导的参考。虽然基于ArUco标记的单目视觉定位方法经过改进已在多种环境和任务中应用,但现有方案通常依赖于将标记精确固定在环境中,由移动机器人携带高清摄像头进行观测。这种方案无法直接应用到蒸汽发生器水室环境中,主要原因有:1)虽然传热管检测是在停工期间进行,但是在核电蒸汽发生器水室环境中有着核辐射的影响<sup>[30]</sup>,无紧急情况下不允许工作人员进入水室中,导致ArUco标记无法按精确的位置布置在水室中;2)受限于机器人尺寸及重量,无法携带高分辨率、大视野摄像头,并且摄像头极易被机器人线缆遮挡,这将导致机器人定位精度降低甚至无法进行定位;3)由于任务和环境的不同,上述研究结果中的定位精度多数无法满足传热管检测机器人定位要求。

针对上述问题,本文基于任务场景特点及先验信息开发传热管检测机器人高精度视觉定位系统,主要贡献如下:1)提出一种基于ArUco标记的传热管检测机器人定位系统布置方案,通过将4个不同的ArUco标记精确布置在机器人的腿部中心位置,并于水室底部布置高分辨率摄像机,提升了传热管检测机器人的定位鲁棒性和持续性;2)结合机器人任务环境先验信息(管板尺寸

及传热管的位置分布信息), 通过气动锚爪位置修正及动态外参更新方法, 提高了机器人气动锚爪的定位精度, 进一步保证传热管检测过程中安全性及检测效率; 3) 基于华龙一号蒸汽发生器模拟体管板环境搭建实验平台, 通过机器人样机测试验证了所提出的视觉定位方法的工程可行性, 为核电站智能检测装备的研发以及狭小密闭空间下的机器人视觉定位方法提供了重要技术参考。

## 1 机器人介绍及定位系统布置

### 1.1 机器人介绍

图 1 给出了蒸汽发生器传热管检测机器人 SG-Climbot 结构方案, 该机器人采用平面四足构型, 其足端配置的气动锚爪可确保机器人在爬行和检测过程中稳定抓持在管板上。机器人的每个爬行周期分为 2 个步骤: 1) 在保持气动锚爪稳定抓持的情况下, 机体进行移动 (同时腿部关节角度发生变化); 2) 每条腿依次执行一系列动作, 包括松开并缩回气动锚爪、转动腿部关节、伸出和涨紧气动锚爪。该机器人配备了一个 3 自由度的检测臂, 其末端携带一个双涡流探头的引导装置。引导装置由两根导向管组成, 可同时对准两根传热管, 并采用高速涡流探头推拨系统将涡流探头插入 U 型传热管中, 完成传热管的检测, 如图 2 所示。

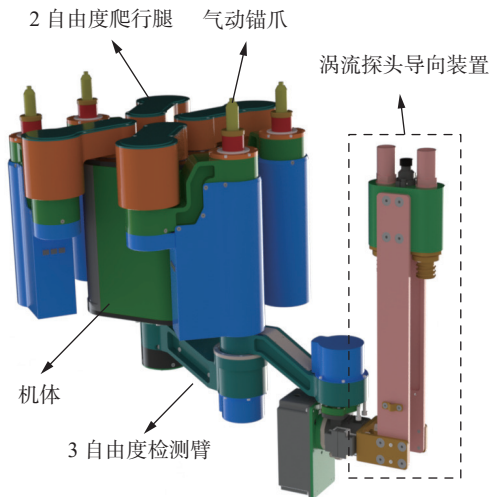


图 1 SG-Climbot 结构  
Fig. 1 Structure of SG-Climbot

### 1.2 视觉定位系统布置

传热管检测机器人的视觉定位系统主要由高分辨率摄像机以及 4 个不同的 ArUco 标记 (选取自 OpenCV 标准库) 两部分组成。如图 3 所示, 系统布置无需工作人员进入人孔, 使用专用工具将摄像机从人孔推入到水室底部。由于机器人机体中

心以及涡流探头检测装置有缆线经过, 不易布置标记, 并且拍摄过程中易被缆线遮挡, 因此将 4 个不同的 ArUco 标记分别布置在机器人各腿部外壳的方形卡槽内 (卡槽中心与气动锚爪几何中心轴线对齐), 该卡槽结构在机械加工阶段即完成预留, 确保标记安装位置的精确性。与现有基于 ArUco 标记视觉定位方法中布置方案相比<sup>[16-18]</sup>, 该布置方案无需机器人自身携带摄像头, 并有效避免了摄像头被机器人线缆遮挡的问题, 水室中的摄像头只需完整识别到 1 个 ArUco 标记即可完成机器人高精度定位。同时, 由于摄像头与机体分离布置, 该方案可以采用高分辨率、大视野摄像头, 且无需人工精确布置摄像头位置。此外, 由于气动锚爪与传热管同轴度偏差小于 0.01 mm (详见 2.4 节), 可以通过人工数管孔的方式确定气动锚爪的近似真实世界坐标, 用于验证视觉系统误差。

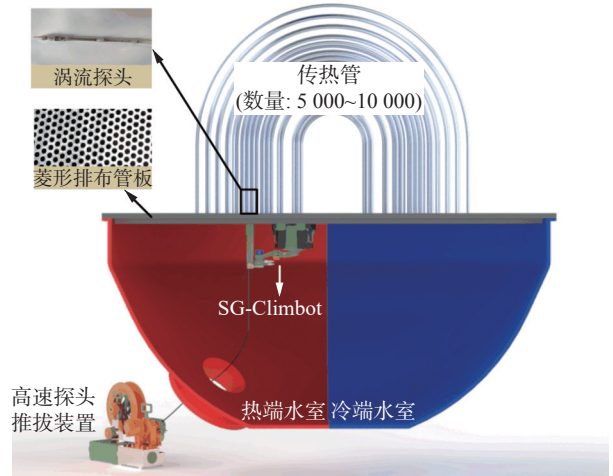


图 2 传热管检测过程  
Fig. 2 Heat transfer tube inspection process

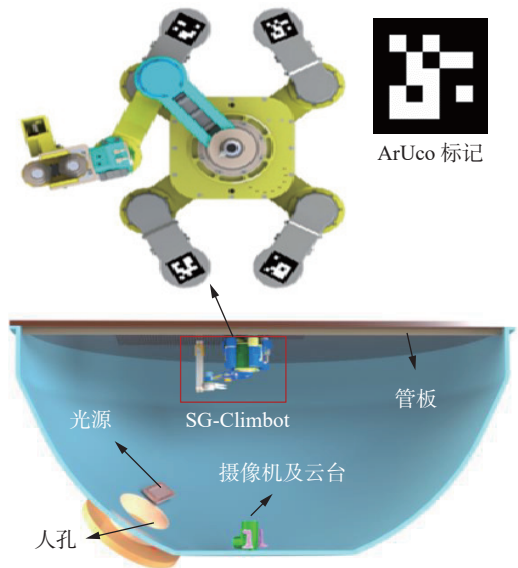


图 3 视觉定位系统布置方案  
Fig. 3 Installation plan of visual positioning system

## 2 视觉定位方法

### 2.1 视觉定位方法目标

机器人关节处配置了 17 位分辨率高精度编码器,各关节之间采用刚性连接,并且关节角度的控制误差小于  $0.1^\circ$ 。在气动锚爪所插入传热管行列号判断正确情况下(气动锚爪与传热管同轴度偏差小于  $0.1\text{ mm}$ , 详见 2.4 节),可以通过编码器反馈和机器人运动学模型有效判断机器人机体中心位置以及探头导向装置所对准的传热管行列号,从而有效避免检测过程中出现错检、漏检或机器人与水室发生碰撞等意外情况。因此视觉定位方法目标为精确判断气动锚爪所插入传热管的行列号,对于本文的任务场景,气动锚爪的最大定位误差需要小于管板上两个传热管的最小间距的  $1/2$ , 才可以通过 2.4 节中的气动锚爪位置修正方法得到气动锚爪所插入的传热管行列号。以华龙一号蒸汽发生器传热管排布为例,如图 4 所示,传热管呈菱形排布,最小间距为  $25\text{ mm}$ , 因此 ArUco 标记的最大定位误差需要小于  $12.5\text{ mm}$ 。

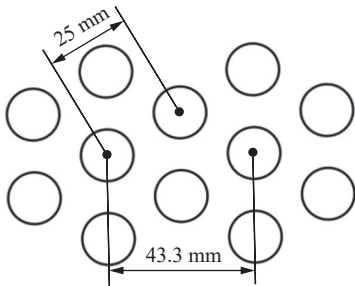


图 4 传热管间距

Fig. 4 Distance between heat transfer tubes

### 2.2 ArUco 标记检测

ArUco 标记是一个用于机器人位姿估计的方形人工标记,由黑色边框和一个内部的二进制编码组成,它的主要优点是检测简单、快速,并且具有强鲁棒性。外部黑色边框主要用于快速定位角点,内部的二进制编码用于识别标记的 ID 和检测错误纠正。由于机器人腿部的尺寸限制,本文使用的 ArUco 标记尺寸为  $45\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 。单个 ArUco 标记的检测步骤如下: 1) 将输入的彩色图像转换为灰度图像,并对灰度图像进行阈值化处理; 2) 提取图像中的四边形轮廓并进一步筛选出符合标记特征的四边形轮廓; 3) 对候选四边形区域进行透视校正,并将校正后的图像划分为固定网格进行二值化判定来解码标记的唯一 ID; 4) 检测图像中标记的角点,并对角点进行亚像素级优化,进一步精确角点像素坐标。通过上述步骤可

以生成 ArUco 标记的 ID 和角点的像素坐标,用于后续的机器人定位。

### 2.3 ArUco 标记定位

ArUco 标记在世界坐标系下的位置估计所需参数为 4 个角点的像素坐标、摄像机内部参数(包含焦距、主点坐标、畸变系数)和摄像机外部参数,世界坐标系到像素坐标系转换的数学表达式为

$$S_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{K} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中:  $S_i$  为标记角点的深度值;  $X_i, Y_i, Z_i$  为标记角点的世界坐标;  $u_i$  和  $v_i$  为角点的像素坐标;  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  为摄像机的旋转矩阵和平移矩阵,也称为摄像机的外参;  $\mathbf{K}$  为摄像机的内部参数矩阵,本文通过张氏标定法<sup>[31]</sup>使用棋盘格纸进行标定,来获得摄像机内参。

由于摄像机外部参数  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  描述了世界坐标系与摄像机坐标系之间的变换关系,结合摄像机外部参数与 ArUco 标记角点在摄像机坐标系下的坐标可以获得 ArUco 标记角点的世界坐标。在摄像机外部参数的计算过程中,可以通过最小化重投影误差来获得计算结果。最小化重投影误差是将角点的世界坐标通过摄像机内外参数矩阵投影到像素平面上得到像素坐标后,通过迭代优化使投影像素坐标与实际检测像素坐标之差最小的过程。 $n$  个三维空间点和它们在图像中投影的重投影误差数学表达式为

$$\sum_{i=1}^n \left\| p_i - \frac{1}{s_i} [\mathbf{K} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P_i \right\|^2 \quad (1)$$

式中  $p_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ ,  $P_i = [X_i \ Y_i \ Z_i \ 1]^T$ , 通过 2.2 节中的检测方法获得  $p_i$ , 使用 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[32]</sup>进行迭代优化得到摄像机外参  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 。SG-Climbot 机器人所携带的气动锚爪对中插入到传热管中,机器人在初始安装到管板后,需要人工数管孔判断气动锚爪所插入的传热管行列号(仅第一次安装)来获得 ArUco 标记中心的世界坐标系位置  $P_i$ , 从而解算出外参  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 。

在外参标定阶段,需同时识别到 3 个以上 ArUco 标记,此时机器人刚被安装至管板上,如超过 1 个 ArUco 标记被遮挡,可人工在水室外拖动线缆进行干预(此时工作人员未离开核岛)。在机器人定位过程中,只需要完整地识别到 1 个 ArUco 标记便可借助机器人关节处配置的高精度编码器信息完成机器人定位。

## 2.4 气动锚爪位置修正

机器人在进行检测中或者完成一个爬行周期后,其气动锚爪必定插入并抓持在传热管(管孔)中。气动锚爪采用三点定位的方法保证其相对传热管的同轴度。如图 5 所示,在抓持传热管的过程中气动锚爪内部的销轴会在气动活塞的作用下向上移动,销轴上的斜面会使小滑靴向外滑动,从而使气动锚爪包络尺寸增大,直到与传热管内壁贴合压紧。

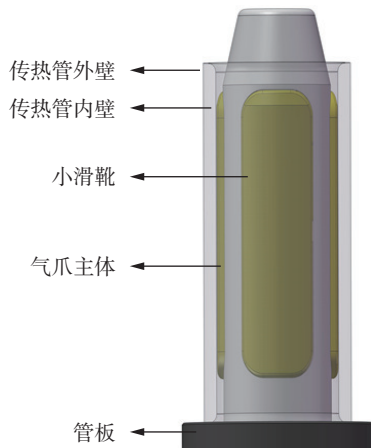


图 5 气动锚爪抓持示意  
Fig. 5 Anchor claw gripping diagram

气动锚爪与传热管的同轴度与其机械结构的加工及装配误差有关,经测量,气动锚爪的机械尺寸链偏差造成的同轴度偏差小于 0.1 mm,气动锚爪的详细结构设计详见该机器人的前序研究<sup>[33]</sup>。因此,在气动锚爪定位误差小于 12.5 mm 的情况下,可以通过找到与气动锚爪位置估计值距离最近的传热管来对气动锚爪位置的估计值进行修正,从而得到气动锚爪的近似真实坐标以及所插入传热管的行列号。该过程可以建模为一个最近邻搜索问题,表示为

$$T_k = \operatorname{argmin}_{T_i \in S} \| P_{\text{meas}} - T_i \| \quad P_{\text{true}} = T_k$$

式中:管板上所有传热管中心的世界平面坐标集合为  $S = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ , 其中  $T_i = (x_i, y_i)$  为第  $i$  个传热管的中心平面坐标;通过 2.3 节方法得到的气动锚爪平面坐标为  $P_{\text{meas}} = (x_m, y_m)$ ;修正后的气动锚爪平面坐标为  $P_{\text{true}} = (x_t, y_t)$ ;  $\|\cdot\|$  表示欧氏距离;  $T_k$  为集合  $S$  中与  $P_{\text{meas}}$  距离最近的传热管中心坐标。

由于机器人在管板上爬行时姿态固定不变,当完成一个爬行周期后,4 个气动锚爪所插入传热管的相对位置是固定的。为了保证核电设施安全,若在极端情况下出现其中一个气动锚爪与另外 3 个气动锚爪所插入传热管的相对位置不符的情况时,会根据相对位置将其更正并进行人工

复核。

## 2.5 动态更新摄像机外部参数

在试验过程中,可以发现机器人在距离摄像机初始外参标定时的安装位置越远时,气动锚爪定位精度越低,因此本文提出外参动态更新的方法来提高机器人气动锚爪定位精度。外参动态更新方法介绍如下:首先,机器人在完成一个爬行周期后,摄像机拍摄照片,使用 2.2 节及 2.3 节中的 ArUco 标记检测及定位方法对气动锚爪进行位置估计;随后,使用 2.4 节中的气动锚爪误差修正方法得到气动锚爪的近似真实值(气动锚爪正抓持在传热管中),此时式(1)中计算外参所需参数已知;最后,通过 2.3 节中的摄像机外参估计方法重新计算摄像机外参,用于后续的机器人气动锚爪定位。机器人每完成一个爬行周期后需进行气动锚爪位置估计,与此同时按上述步骤进行外参更新,以防止定位精度低导致的人工复检高频发生。此外,在每次更新外参前,允许小范围移动摄像机视角(Aruco 标记需保持在摄像机拍摄图片内),解决摄像机视野不足难以在相同拍摄角度下覆盖整个管板的问题。需要注意的是,只有在保证 3 个以上 Aruco 标记同时被识别到的条件下才可以进行外参更新,如果不满足条件则沿用前序的摄像机外参。

## 3 机器人定位试验

本文中的视觉定位方法使用 Python 3.10 在台式计算机上实现。试验平台由 4 部分组成:1) 足式传热管检测机器人 SG-Climbot; 2) 海康威视摄像机,型号 DS-V108(自带旋转云台); 3) 4 个高精度 ArUco 标记,采用玻璃基板和氧化铝面板制成,不反光不透光(避免反光导致标记未能有效识别),具体尺寸为 45 mm × 45 mm × 2 mm; 4) 漫反射光源(保证光照均匀); 5) 台式计算机,操作系统为 Windows 10, CPU 为 Intel Core i7-10700 K。将机器人安装至华龙一号蒸汽发生器模拟体管板上,通过人工数孔的方式完成摄像机初始外参标定。随后机器人爬行至管板上 40 个不同的位置,通过摄像机传回的图片进行气动锚爪位置估计(机器人爬行至每个位置后需要分别对 4 个气动锚爪进行位置估计,总计进行了 160 次气动锚爪位置估计)。

图 6 为摄像机拍摄到机器人在管板上不同爬行位置的图像,图 6 中机器人气动锚爪的估计位置(使用外参动态更新方法后)与真实位置数据见表 1。

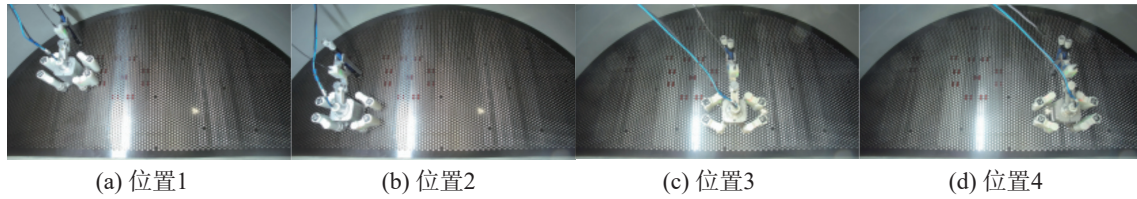


图 6 机器人爬行至不同位置  
Fig. 6 Robot crawl to different positions

表 1 气动锚爪估计位置与真实位置 (图 6 中)  
Table 1 The estimated and actual positions of the anchor claws (Figure 6)

| 图     | 位置/mm | 气动锚爪1              | 气动锚爪2             | 气动锚爪3             | 气动锚爪4             |
|-------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 图6(a) | 估计位置  | (1020.71, 1039.15) | (638.29, 1036.67) | (633.51, 912.62)  | (1026.62, 911.98) |
|       | 真实位置  | (1024.26, 1037.50) | (634.56, 1037.50) | (634.56, 912.50)  | (1024.26, 912.50) |
|       | 定位误差  | 3.91               | 3.82              | 1.06              | 2.42              |
| 图6(b) | 估计位置  | (1021.13, 690.24)  | (633.40, 690.05)  | (635.47, 561.72)  | (1026.21, 561.26) |
|       | 真实位置  | (1024.26, 687.50)  | (634.56, 687.50)  | (634.56, 562.50)  | (1024.26, 562.50) |
|       | 定位误差  | 4.16               | 2.80              | 1.20              | 2.31              |
| 图6(c) | 估计位置  | (1803.42, 686.04)  | (1414.77, 682.25) | (1413.37, 561.30) | (1803.40, 562.27) |
|       | 真实位置  | (1803.68, 687.50)  | (1413.98, 687.50) | (1413.98, 562.50) | (1803.68, 562.50) |
|       | 定位误差  | 1.48               | 5.31              | 1.35              | 0.36              |
| 图6(d) | 估计位置  | (2147.23, 685.06)  | (1760.51, 688.43) | (1760.47, 563.47) | (2149.92, 561.75) |
|       | 真实位置  | (2150.09, 687.50)  | (1760.39, 687.50) | (1760.39, 562.50) | (2150.09, 562.50) |
|       | 定位误差  | 3.76               | 0.94              | 0.97              | 0.77              |

图 7 为采用动态更新外参方法前后, 4 个气动锚爪的平均定位误差随着机器人爬行周期增加的变化趋势 (爬行周期数量越大距离进行初始摄像机外参标定的位置越远)。若不采用动态更新外参方法, 随着机器人爬行过程进行, 4 个气动锚爪的平均定位误差增大。采用动态更新外参方法后, 随着机器人爬行过程进行, 4 个气动锚爪的平均定位误差无明显变化趋势, 误差在一定范围内波动。

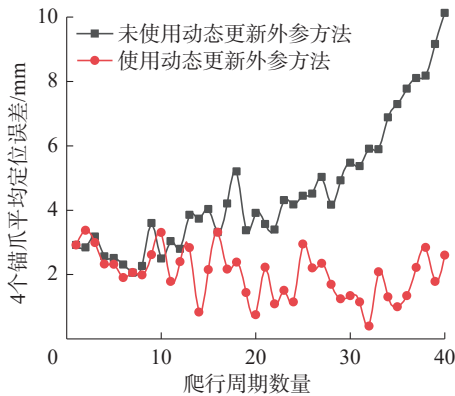


图 7 定位误差随爬行周期数变化趋势  
Fig. 7 Trend of positioning error changing with the number of crawling cycles

表 2 为使用动态更新外参方法前后的 160 次气动锚爪 (ArUco 标记) 位置估计的最大定位误差

以及平均定位误差。未使用外参更新方法时气动锚爪平均定位误差为 4.57 mm, 最大定位误差为 11.84 mm。使用外参更新方法后, 气动锚爪平均定位误差为 2.01 mm, 最大定位误差为 6.75 mm (满足此场景下的最大定位误差限制, 且留有一定安全裕度), 相比于未使用动态外参更新方法的平均定位误差降低 56.02%, 最大定位误差降低 42.99%。在该最大误差下, 可通过 2.4 节中的气动锚爪误差修正方法来正确判断气动锚爪所插入的传热管行列号, 并结合编码器反馈以及机器人运动学模型有效判断机器人机体中心位置以及探头导向装置所对准的传热管行列号, 从而避免检测过程中出现错检、漏检或机器人与水室发生碰撞等意外情况。采用本文方法时, 摄像机外参标定时间为 0.05 s, 单个气动锚爪位置估计时间为 0.02 s, 可保证机器人定位过程中的实时性。

表 2 气动锚爪的平均定位误差及最大定位误差 (160 次)  
Table 2 Average and maximum positioning errors of anchor claws(160 times)

| 定位误差   | 未动态更新/mm | 动态更新/mm | 误差降低率/% |
|--------|----------|---------|---------|
| 平均定位误差 | 4.57     | 2.01    | 56.02   |
| 最大定位误差 | 11.84    | 6.75    | 42.99   |

## 4 结束语

针对蒸汽发生器水室工作环境下的传热管检测机器人自主定位能力不足导致传热管运维效率降低的问题,本文提出并实现了一种基于 ArUco 标记的传热管检测机器人自主定位方法。本文根据任务环境特点及先验信息,改进了现有方法中 ArUco 标记(ArUco 标记中心与气动锚爪几何中心轴线对齐)及摄像机布置方案,提升传热管检测机器人的定位鲁棒性和持续性。此外,提出了一种动态摄像机外参更新方法,通过在机器人爬行过程中实时更新摄像机外参,提高了机器人气动锚爪(ArUco 标记)的定位精度。在蒸汽发生器模拟体的视觉定位试验表明,使用本文提出视觉定位方法时气动锚爪平均定位误差为 2.01 mm(降低 56.02%)、最大定位误差为 6.75 mm(降低 42.99%),摄像机外参标定时间为 0.05 s,单个气动锚爪位置估计时间为 0.02 s。在该误差条件下,可通过气动锚爪误差修正方法来正确判断气动锚爪所插入的传热管行列号,进而结合编码器及机器人运动学模型来计算机体中心及涡流探头导向装置位置。

在视觉系统的布置上,尽量避免 ArUco 标记被机器人线缆遮挡,但在特殊情况下如果全部标记被遮挡,只能忽略这次定位结果。因此在后续研究中,将解决 ArUco 标记局部被遮挡的情况下,如何进行识别以及定位(例如大标记改为多个小标记或仅使用 ArUco 标记部分轮廓进行定位)。并且由于蒸汽发生器水室工作环境为密闭空间,光源的强弱对视觉识别效果具有一定影响。未来本研究将通过改良光源以及尝试不同感光能力的摄像机来进一步提高机器人定位精度。

## 参考文献:

- [1] YE Qizhen. Safety and effective developing nuclear power to realize green and low-carbon development[J]. *Advances in climate change research*, 2016, 7(1/2): 10-16.
- [2] 张祎轩,张雪艳,彭翠婷,等.核能与可再生能源耦合技术概述[J].*核科学与技术*, 2023, 11(3): 249-259. ZHANG Yixuan, ZHANG Xueyan, PENG Cuiting, et al. Review of nuclear and renewable energy coupling technologies[J]. *Nuclear science and technology*, 2023, 11(3): 249-259.
- [3] GUO Xianglong, LAI Ping, LI Ling, et al. Progress in studying the fretting wear/corrosion of nuclear steam generator tubes[J]. *Annals of nuclear energy*, 2020, 144: 107556.
- [4] HUANG Jinlu, WANG Chenglong, GUO Kailun, et al. Heat transfer analysis of heat pipe cooled device with thermoelectric generator for nuclear power application[J]. *Nuclear engineering and design*, 2022, 390: 111652.
- [5] PAGE L O, OBRUTSKY L, RENAUD J, et al. Overview of steam generator tube-inspection technology[J]. *CINDE journal*, 2014, 35(2): 1-9.
- [6] LI Jiawei, LIU Zhaojin, LI Sicen, et al. Motion planning for a quadruped robot in heat transfer tube inspection[J]. *Automation in construction*, 2024, 168: 105753.
- [7] LI Jiawei, LIU Zhaojin, LI Yuxiao, et al. Localized coverage planning for a heat transfer tube inspection robot[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2025, 10(4): 3916-3923.
- [8] 宋冠宇,陈鹏,肖巍,等.核电蒸汽发生器管板制造过程中的质量控制[J].*电力安全技术*, 2023, 25(12): 71-74. SONG Guanyu, CHEN Peng, XIAO Wei, et al. Quality control in the manufacturing of nuclear power steam generator tubesheet parts[J]. *Electric power safety technology*, 2023, 25(12): 71-74.
- [9] 唐博,汪双印,唐岚,等.机器视觉在核电站蒸发器涡流检测中的应用[J].*无损检测*, 2018(10): 26-28, 44. TANG Bo, WANG Shuangyin, TANG Lan, et al. Application of machine vision in eddy current testing of nuclear power plant steam generators[J]. *Nondestructive testing*, 2018(10): 26-28, 44.
- [10] CONGRAM B, BARFOOT T D. Field testing and evaluation of single-receiver GPS odometry for use in robotic navigation[J]. *Field robotics*, 2022, 2: 1849-1873.
- [11] WU Chong, GONG Zeyu, TAO Bo, et al. RF-SLAM: UHF-RFID based simultaneous tags mapping and robot localization algorithm for smart warehouse position service[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2023, 19(12): 11765-11775.
- [12] YANG Runming, YANG Xiaolong, WANG Jiacheng, et al. Decimeter level indoor localization using WiFi channel state information[J]. *IEEE sensors journal*, 2022, 22(6): 4940-4950.
- [13] BAI Nan, TIAN Yuan, LIU Ye, et al. A high-precision and low-cost IMU-based indoor pedestrian positioning technique[J]. *IEEE sensors journal*, 2020, 20(12): 6716-6726.
- [14] SEKARAN J F, KALUVAN H, IRUDHAYARAJ L. Modeling and analysis of GPS-GLONASS navigation for car like mobile robot[J]. *Journal of electrical engineering & technology*, 2020, 15(2): 927-935.
- [15] 武东杰,仲训昱,崔晓珍,等.具有全局速度约束的惯性/编码器/视觉/激光融合定位方法:IEVL-Fusion[J].*机器人*, 2022, 44(4): 443-452. WU Dongjie, ZHONG Xunyu, CUI Xiaozhen, et al. IEVL-fusion: an inertial/encoder/vision/laser fusion positioning method with global velocity constraint[J]. *Robot*, 2022, 44(4): 443-452.

- [16] 朱轶峰. 基于 WiFi-BP 的室内定位算法[J]. *电子科技*, 2020, 33(8): 74–79.  
ZHU Yifeng. Indoor positioning algorithm based on WiFi-BP[J]. *Electronic technology*, 2020, 33(8): 74–79.
- [17] 张云凡, 江励, 徐俊佳, 等. 基于单目视觉的机器人定位算法[J]. *机电工程技术*, 2024, 53(5): 159–161.  
ZHANG Yunfan, JIANG Li, XU Junjia, et al. Research on robot positioning algorithm based on monocular vision[J]. *Mechanical and electrical engineering technology*, 2024, 53(5): 159–161.
- [18] 段志瑜, 罗哉, 江文松, 等. 基于改进 ArUco 标签的位姿估计方法[J]. *计量学报*, 2024, 45(3): 364–371.  
DUAN Zhiyu, LUO Zai, JIANG Wensong, et al. Pose estimation method based on improved ArUco tags[J]. *Acta metrologica sinica*, 2024, 45(3): 364–371.
- [19] 张文, 杨耀鑫, 黄天帆, 等. ArUco 辅助的爬壁机器人自主定位方法[J]. *机器人*, 2024, 46(1): 27–35, 44.  
ZHANG Wen, YANG Yaoxin, HUANG Tianchi, et al. ArUco-assisted autonomous localization method for wall climbing robots[J]. *Robot*, 2024, 46(1): 27–35, 44.
- [20] ARIE WICAKSANA H B, MARDIYANTO R, IRFANSYAH A N. Drone position tracking system based on object detection and ArUco marker for autonomous navigation applications[C]//2024 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. Mataram: IEEE, 2024.
- [21] KHAN D, ULLAH S, RABBI I. Factors affecting the design and tracking of ARToolKit markers[J]. *Computer standards & interfaces*, 2015, 41: 56–66.
- [22] FIALA M. ARTag, a fiducial marker system using digital techniques[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE, 2005.
- [23] OLSON E. AprilTag: a robust and flexible visual fiducial system[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011.
- [24] GARRIDO-JURADO S, MUÑOZ-SALINAS R, MADRID-CUEVAS F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion [J]. *Pattern recognition*, 2014, 47(6): 2280–2292.
- [25] MARUT A, WOJCIOWICZ K, FALKOWSKI K. ArUco markers pose estimation in UAV landing aid system[C]//2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace. Torino: IEEE, 2019.
- [26] CHINCHILLA S, SAITO T, OIKAWA R, et al. Real-time marker-based monocular autonomous docking in semi-unstructured indoor environments[C]//2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Ha Long City: IEEE, 2024.
- [27] XU Zhizun, HAROUTUNIAN M, MURPHY A J, et al. An underwater visual navigation method based on multiple ArUco markers[J]. *Journal of marine science and engineering*, 2021, 9(12): 1432.
- [28] ZHENG Jingxiang, BI Shusheng, CAO Bo, et al. Visual localization of inspection robot using extended Kalman filter and aruco markers[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Kuala Lumpur: IEEE, 2018.
- [29] IRFAN M, DALAI S, KISHORE K, et al. Vision-based guidance and navigation for autonomous MAV in indoor environment[C]//2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. Kharagpur: IEEE, 2020.
- [30] KIM J Y, KIM J W, LEE D H, et al. Assessment of radiation dose during the installation and removal of steam generator primary nozzle dam in overhaul period[J]. *Journal of radiation protection and research*, 2024, 49(4): 187–195.
- [31] ZHANG Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra: IEEE, 1999.
- [32] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010.
- [33] LIU Zhaojin, LI Jiawei, CHEN Jian, et al. The SG-climbot: an adaptable, efficient, inspection and repair robot for steam generator heat transfer tube sheet[J]. *Journal of field robotics*, 2025, 42(4): 1080–1102.

#### 作者简介:



王刚, 国家级高层次青年人才, 教授, 博士生导师, 黑龙江省青年科技奖获得者, 研究方向为水下机器人与环境适配技术。主持国家自然科学基金(3项)、国家重点研发计划课题(2项)等项目 30 余项。发表学术论文 30 余篇, 授权发明专利 70 余件。E-mail: wanggang@hrbeu.edu.cn。



张国成, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为水下机器人技术。先后主持及参与了国家自然科学基金、国家重点研发计划, 授权发明专利 10 余项, 发表学术论文 30 余篇。E-mail: zhangguocheng@hrbeu.edu.cn。



李嘉玮, 博士研究生, 入选 2024 年中国科协青年人才托举工程博士生专项, 主要研究方向为机器人运动规划及视觉定位技术, 发表学术论文 5 篇。E-mail: ljw1996@hrbeu.edu.cn。

[ 责任编辑: 刘冰洁 ]