

# 基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法

雷孟宇<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1,2</sup>, 杨文娟<sup>1,2</sup>, 万继成<sup>1</sup>, 杜昱阳<sup>1,2</sup>, 余恒翰<sup>1</sup>, 田琛辉<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 煤矿巷道支护装备的自动化和智能化程度不足, 严重阻碍了煤矿巷道成形效率的提升, 成为造成“采掘失衡”现象的关键因素之一。为解决煤矿巷道支护装备自动化程度低、支护效率差的难题, 设计了一种集成悬臂式掘进机和多自由度机械臂的钻锚机器人, 提出了基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法。首先提出了基于双目视觉的锚钻孔空间定位方法, 利用三角原理实现锚钻孔精确定位; 其次, 通过机械臂关节布置的位移传感器和角度传感器检测对应关节的移动距离和旋转角度, 利用改进的 Denavit-Hartenberg (MDH) 方法构建钻锚机器人机械臂运动学模型, 实现机械臂末端执行器空间位置解算, 确定末端执行器初始位置和目标位置; 然后, 提出一种基于分步视觉伺服的钻锚机器人机械臂运动控制方法, 利用末端执行器位置构建基于位置的视觉控制模型, 控制机械臂接近目标锚钻孔, 实现机械臂的粗略控制; 以锚钻孔外切矩形 4 个顶点的图像坐标为特征点, 建立特征点运动速度与机械臂关节运动速度的映射关系, 构建基于图像的视觉伺服控制模型, 控制末端执行器快速精确对准目标锚钻孔中心, 实现机械臂的精确控制; 最后, 搭建钻锚机器人实验平台, 在实验室环境下完成锚钻孔视觉定位与机械臂视觉伺服控制仿真及实验。结果表明: 提出的锚钻孔定位方法在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  3 个方向定位平均误差分别为 7.5、7.8、8.1 mm; 提出的分步视觉伺服控制方法能够实现机械臂的粗略和精确控制, 末端执行器可以快速精确到达目标锚钻孔目标位置。基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法能够有效提升支护系统的自动化程度, 为巷道支护的减人提效奠定了良好基础。

**关键词:** 钻锚机器人; 视觉定位; 位置视觉控制; 图像视觉伺服控制; 锚钻孔

中图分类号: TD421.5 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)03-1827-11

## Research on step-by-step visual servo control system of anchor drilling robot

LEI Mengyu<sup>1</sup>, ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>, YANG Wenjuan<sup>1,2</sup>, WAN Jicheng<sup>1</sup>, DU Yuyang<sup>1,2</sup>, YU Henghan<sup>1</sup>, TIAN Chenhui<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Detection and Control for Mining Electromechanical Equipment, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The insufficient automation and intelligentization of coal mine roadway support equipment has severely hindered the improvement of roadway formation efficiency, emerging as one of the critical factors contributing to the imbalance of excavation and support. To address the challenges of low automation levels and poor support efficiency in existing roadway support systems, this study has developed an anchor drilling robot integrating a boom-type roadheader with a multi-degree-of-freedom manipulator, proposing a step-by-step visual servo-based control methodology. Firstly, a binocular vision-based spatial positioning method for drilling holes was established utilizing triangulation principles to achieve precise hole localization. Secondly, through displacement and angular sensors deployed on manipulator joints, this

收稿日期: 2024-02-01 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0126

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174149, 52104166); 陕煤联合基金资助项目 (2021JLM-03)

作者简介: 雷孟宇 (1991—), 男, 陕西商洛人, 讲师, 博士。E-mail: leimy@xust.edu.cn

通讯作者: 张旭辉 (1972—), 男, 陕西凤翔人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

引用格式: 雷孟宇, 张旭辉, 杨文娟, 等. 基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1827-1837.

LEI Mengyu, ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, et al. Research on step-by-step visual servo control system of anchor drilling robot[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1827-1837.



移动阅读

study constructed an enhanced kinematic model using the modified Denavit-Hartenberg (MDH) method, enabling accurate spatial position resolution of the end-effector and determination of its initial and target positions. Thirdly, a novel step-by-step visual servo control strategy was developed: a position-based visual control model governs the manipulator's coarse positioning near target holes, followed by an image-based visual servo model that establishes mapping relationships between feature point velocities (derived from circumscribed rectangle vertices of drilling holes) and joint velocities, enabling precise centering alignment. Finally, an experimental platform was established to validate the proposed methods under laboratory conditions. Test results demonstrate average positioning errors of 7.5, 7.8, and 8.1 mm in  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  axes respectively, with the step-by-step control approach successfully achieving both coarse positioning and fine alignment. This research significantly enhances the automation level of support systems, laying a technical foundation for workforce reduction and efficiency improvement in roadway support operations.

**Key words:** anchor drilling robot; visual positioning; position-based visual control; image-based visual servo; drilling hole

## 0 引 言

随着煤矿智能化的大力推进,自动化成套装备和大数据、数字孪生、机器人、人工智能等新一代高新技术在综掘工作面得到应用,“采掘失衡”现象得到有效缓解<sup>[1-4]</sup>。由于巷道支护工艺复杂,涉及铺网、上钢带、钻孔、卸钻杆、安装锚固剂、安装锚杆、搅拌锚固剂及预紧杆尾螺母等;同时支护装备自动化、智能化程度有限,“掘快支慢”已经成为制约煤矿“智能、安全、高效、绿色”高质量发展的重要难题。当前巷道支护主要依靠人工操作单体锚杆钻机完成,甚至整个工作过程处于空顶距下,这种操作方式支护效率低,安全性差,容易造成较大的人员伤害事故<sup>[5-7]</sup>。因此,提高支护装备自动化、智能化程度是解决支护效率低下难题的重要途径,也是目前行业研究热点。

为实现“无人则安”,机器人代替人工进行煤矿井下作业是研究热点。机械臂因其效率高、稳定性强和可拓展性等优势,在煤矿生产各个领域应用越来越广泛,主要包括钻锚机器人、支护机器人、喷浆机器人、除尘机器人和运网机器人等<sup>[8-10]</sup>。王成军等<sup>[11]</sup>设计了用于井下巡检的多任务型双臂机器人,验证了动力学模型的合理性,满足井下巡检作业要求;高佳晨等<sup>[12]</sup>设计了一种自动取网、送网、布网的锚网输送机器人系统,利用机械臂作为取网机构,具有较高的运输效率;李世军等<sup>[13]</sup>开发了基于防爆机器臂的冲尘机构,实现了自适应冲尘;马宏伟等<sup>[14]</sup>设计的多机械臂多钻机协作的煤矿巷道钻锚机器人,有力推动了掘进支护技术的创新和进步;周东旭等<sup>[15]</sup>研究了煤矿轻型协作机械臂运动学求解,为协作机械臂精确定位和运动控制提供了必要的前提条件;韩涛等<sup>[16]</sup>针对救援机器人机械臂轨迹规划不合理、规划方法收敛速度慢等问题,提出了基于融合杜鹃搜索的灰狼优化算法的机械臂

轨迹规划方法;孙晓宇等<sup>[17]</sup>研究了锚杆钻车冗余机械臂运动学问题,解决了特殊机构机械臂运动学逆解的难题;王鹏等<sup>[18]</sup>研究了煤矸石分拣机器人动态目标精准抓取算法,实验结果验证了算法的准确性、高效性和稳定性;张君等<sup>[19]</sup>提出一种基于鲸鱼算法整定控制参数的钻锚机器人机械臂运动控制方法,为无人钻锚机械臂精准定位和自动支护奠定了基础;刘送永等<sup>[20]</sup>设计了一等种灵活性高的多自由度冗余喷浆机械臂,能够满足喷浆工艺要求;马宏伟等<sup>[21]</sup>设计了多机械臂捡矸机器人,提高了煤矸石智能分拣的可靠性和分拣效率。

机器人视觉伺服控制技术将实时视觉信息作为反馈,实现对环境进行非接触式测量,极大的提高了机器人系统的灵活性与精确性,在机械臂、移动机器人和飞行器上均有广泛应用。纪鹏等<sup>[22]</sup>提出了一种适用于移动机械手 5 关节状态反馈情况的基于人一机一机协作的无标定视觉伺服控制系统;邹焱飏等<sup>[23]</sup>设计了一套焊缝跟踪系统,焊缝轨迹跟踪准确,抗干扰能力强;梁喜凤等<sup>[24]</sup>提出了自适应无迹卡尔曼滤波的采摘机械手视觉伺服控制方法,有效提高系统定位精度,减小噪声干扰;李静等<sup>[25]</sup>提出了一种基于长短期记忆卡尔曼滤波算法的矿用智能巡检机器人视觉伺服控制方法,结果表明该方法具有较强的抗噪声干扰能力,有效提高了巡检机器人作业精度与效率;MA 等<sup>[26]</sup>提出了一种基于视觉伺服的小尺寸零件装配机器人抓取与对准方法,实验验证了该方法的有效性;CHANG 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于视觉伺服的智能手机后壳组装方法,在工业制造领域具有较大潜力;董鹏飞<sup>[28]</sup>利用基于位置的视觉伺服控制方法研究了机器人对静止目标的定位抓取和运动目标的识别跟踪;KIM 等<sup>[29]</sup>采用双目相机结合 CAMSHIFT 算法实现了对三维空间目标的追踪。以上方法研究了基于位置

或图像的视觉伺服控制方法, 在各个领域均有一定的应用。实际使用过程中, 仅依靠单一的视觉伺服控制方法对全流程作业状态并不完全有效。因此, 将基于位置与基于图像的视觉伺服控制方法结合使用, 能够提升控制精度。针对砌砖过程中砌砖机器人的机械臂无法正常抓取的问题, 谢苗等<sup>[30]</sup>提出了一种无标定六自由度砌砖机械臂视觉伺服控制方法, 大幅度降低了机械臂运动误差; 赵源深<sup>[31]</sup>提出了基于双目定位的西红柿采摘机器人控制方法, 为消除存在的空间定位误差, 利用视觉伺服微操控制方法实现精确采摘; SHANG 等<sup>[32]</sup>提出了一种将基于位置的视觉伺服控制与基于图像的视觉伺服控制相结合的混合控制策略, 实现通孔元件的高精度对针焊接, 提高了工业 PCB 的质量和可靠性。煤矿顶板支护作业过程中, 安装在机身上的视觉传感器可以对整个场景进行观察, 但是其距离目标较远, 定位精度不高; 安装在钻臂末端的视觉传感器视场较小, 但其距离锚钻孔较近, 对外界干扰鲁棒性强, 运动灵活性较高。

笔者提出了一种基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法。利用双目视觉测量原理构建锚钻孔空间坐标测量模型, 实现锚钻孔精确定位; 利用基于位置的视觉控制方法控制钻臂接近锚钻孔, 实现钻臂粗略控制; 利用基于图像的视觉伺服控制方法控制钻臂运动至锚钻孔中心位置, 实现钻臂精确控制。实验结果验证了定位结果的准确性和控制方法的有效性。

## 1 钻锚机器人视觉伺服控制系统设计

钻锚机器人视觉伺服控制系统组成如图 1 所示,

主要包括钻锚机器人、双目视觉测量系统、单目视觉测量系统, 其中双目视觉测量系统布置在操作台前端, 单目视觉系统布置在钻机末端, 在钻臂各个关节上布置位移传感器和角度传感器测量对应关节的运动量。系统能够实现锚钻孔精确定位及钻锚机器人运动控制等功能。

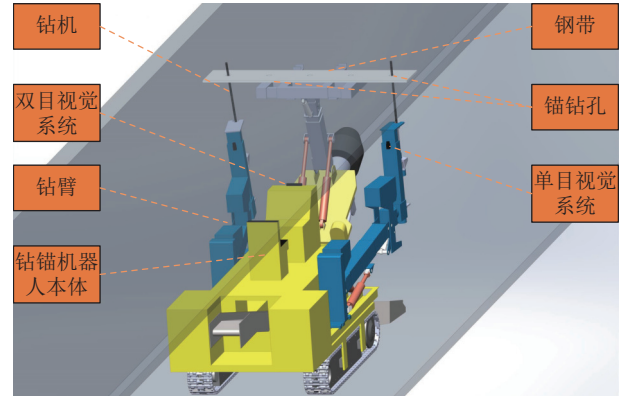


图 1 钻锚机器人视觉伺服控制系统组成

Fig.1 Composition of visual servo control system for anchor drilling robot

基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制系统总体方案如图 2 所示, 该方案主要包括双目视觉定位模块、基于位置的视觉控制模块和基于图像的视觉伺服控制模块。

系统工作时, 首先是双目视觉系统采集顶板钢带图像, 利用团队提出煤矿井下视觉传感器标定与误差补偿方法<sup>[33-35]</sup>对视觉测量系统进行校正, 并对采集图像进行增强, 降低照度、高浓度粉尘和水汽等复杂环境对图像的影响, 提高图像对比度和亮度, 改善图像

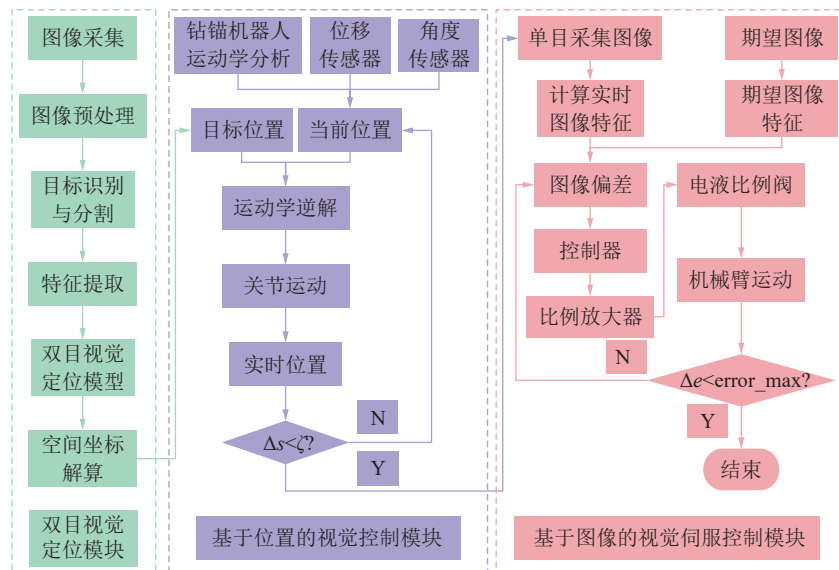


图 2 钻锚机器人基于分步视觉伺服控制系统总体方案

Fig.2 Overall scheme of anchor drilling robot based step-by-step servo control method



质量;在此基础上,通过锚钻孔的识别与分割、特征提取等步骤,利用双目视觉定位模型完成锚钻孔空间定位;其次,构建钻锚机器人钻臂运动学模型,利用传感器采集各关节变量信息确定末端执行器当前位置,以锚钻孔空间坐标作为期望目标位置,在运动学分析基础上驱动钻臂运动至目标位置,同时实时测量目标位置与当前位置距离,若其距离小于设定阈值,则系统进入下一流程;设定好期望图像并提取期望图像特征,利用布置在钻机末端的单目相机采集顶板钢带图像并实时计算图像特征,以图像特征偏差设计控制器,通过比例放大器、电液比例阀等控制机械臂各关节运动,当图像偏差小于设定阈值时系统流程结束,实现锚钻孔空间坐标精确测量和钻锚机器人基于分步视觉伺服的精确控制。

## 2 钻锚机器人运动学分析

### 2.1 钻臂关节坐标系建立

钻锚机器人集成悬臂式掘进机和 2 个六自由度钻臂,钻机作为末端执行器固连在钻臂末端。悬臂式掘进机用于完成煤矿巷道的截割,钻臂用于完成巷道顶板支护。顶板支护过程中,主要依靠钻臂的运动控制钻机移动至顶板钢带的锚钻孔中心。因此,钻锚机器人钻臂运动学分析是运动控制的关键,关系着钻机空间位置。由于钻锚机器人 2 个钻臂平行布置在钻锚机器人两侧,其参数完全一致,因此选取其中一个进行研究分析。

根据 MDH 方法对钻臂连杆和关节进行建模分析。钻臂各关节坐标系  $X_iY_iZ_i (i=0\sim6)$  如图 3 所示,坐标系  $X_0Y_0Z_0$  与  $X_1Y_1Z_1$  重合,固定在基座上。由于钻臂包括 5 个旋转关节和 1 个移动关节,因此变量  $d_3$  表示连杆 3 的偏移量,  $\theta_1 \sim \theta_6$  表示对应关节转动角度。

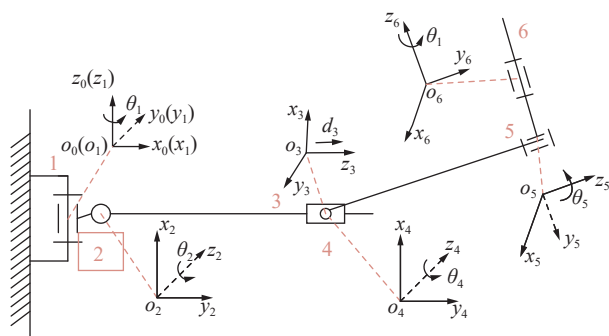


图 3 基于 MDH 方法构建的关节坐标系

Fig.3 The joint coordinate system based on MDH method

在构建的关节坐标系的基础上,通过测量钻臂相关参数,可以得到钻臂 DH 参数表 (表 1), 其中  $a_{i-1}$  为连杆长度,  $\theta_{i-1}$  为连杆扭转角,  $\theta_i$  为转动关节的关节角,

$d_i$  为连杆偏移。

表 1 六自由度钻臂 DH 参数

Table 1 DH parameters of the six degrees of freedom manipulator

$i$	$\theta_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$d_i/\text{mm}$	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	-90	0	0	$\theta_2 - 90$
3	-90	0	$1000 + d_3$	0
4	90	0	0	$\theta_4$
5	-90	0	0	$\theta_5 + 90$
6	90	0	0	$\theta_6$

### 2.2 钻臂运动学分析

在钻臂关节坐标系基础上,相邻关节的转换关系可以通过转换矩阵  $T$  表示。坐标系  $\{i\}$  和坐标系  $\{i-1\}$  的转换关系可以用转换矩阵  ${}^{i-1}_iT$  表示为

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $a_{i-1}$  为连杆长度;  $\theta_{i-1}$  为连杆扭转角;  $\theta_i$  为转动关节的关节角;  $d_i$  为连杆偏移。

将 DH 参数代入式 (1), 得到相邻关节的转换矩阵:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1000 + d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} -\sin \theta_5 & -\cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\cos \theta_5 & \sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此, 钻臂末端执行器 (钻机) 相对钻臂基坐标系的转换矩阵为

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上述转换矩阵各个元素为

$$\begin{aligned} n_x &= c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_4) s\theta_6 + s\theta_1 c\theta_5 c\theta_6 - c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 c\theta_6 \\ o_x &= c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 s\theta_6 - s\theta_1 c\theta_5 s\theta_6 + c\theta_1 c(\theta_2 + \theta_4) c\theta_6 \\ a_x &= c\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) c\theta_5 + s\theta_1 s\theta_5 \\ p_x &= c\theta_1 c\theta_2 (1000 + d_3) \\ n_y &= -s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_1 c\theta_5 c\theta_6 + s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_4) s\theta_6 \\ o_y &= s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 s\theta_6 + c\theta_1 c\theta_5 s\theta_6 + s\theta_1 c(\theta_2 + \theta_4) c\theta_6 \\ a_y &= s\theta_1 s(\theta_2 + \theta_4) c\theta_5 - c\theta_1 s\theta_5 \\ p_y &= s\theta_1 c\theta_2 (1000 + d_3) \\ n_z &= -c(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 c\theta_6 - s(\theta_2 + \theta_4) s\theta_6 \\ o_z &= c(\theta_2 + \theta_4) s\theta_5 s\theta_6 - s(\theta_2 + \theta_4) c\theta_6 \\ a_z &= c(\theta_2 + \theta_4) c\theta_5 \\ p_z &= -s\theta_2 (1000 + d_3) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $c$  为  $\cos$ ;  $s$  为  $\sin$ 。

通过钻臂各个关节上布置的位移传感器和倾角传感器能够实时得到钻臂各个关节的运动量, 将其代入式 (3) 即可得到钻臂末端执行器钻机相对于钻臂基坐标系的转换矩阵, 也就能得到钻机的空间位姿。

### 3 钻臂分步视觉伺服控制方法

#### 3.1 锚钻孔视觉定位

笔者选用平行双目视觉系统, 该系统模型中, 左右相机具有相同的参数, 相机左右成像平面共面且行对准, 光轴经过图像平面中心且垂直于图像平面, 其原理如图 4 所示。图中,  $O_w X_w Y_w Z_w$ 、 $O_l X_l Y_l Z_l$ 、 $O_r X_r Y_r Z_r$  分别为世界坐标系、左相机坐标系和右相机坐标系,  $O_l$  和  $O_r$  分别为左右相机光心,  $C_l$  和  $C_r$  分别为左右相机成像平面,  $u_l v_l$  和  $u_r v_r$  分别为左右图像平面像素坐标系,  $B$  为左右相机光心位置之间的距离, 即双目相机基线距离,  $f$  为相机焦距。基线距离和相机参数均可通过相机标定得到。对于空间任意目标点  $A$ , 假设  $A$  点在世界坐标系下的坐标是  $A(X, Y, Z)$ ,  $a_l(u_l, v_l)$  和  $a_r(u_r, v_r)$  为  $A$  点在左右图像平面成像点, 笔者所述模型为理想的双目立体测量模型,  $a_l$  和  $a_r$  在像素坐标系中纵坐标相等, 即  $v_l = v_r$ , 横坐标的差值  $u_l - u_r$  称为

视差值, 双目视觉定位原理就是基于图像视差值实现。由小孔成像原理和图像中的几何关系可以得到:

$$\begin{aligned} X &= \frac{u_l}{u_l - u_r} B, \\ Y &= \frac{v_l}{u_l - u_r} B, \\ Z &= \frac{f}{u_l - u_r} B. \end{aligned} \quad (4)$$

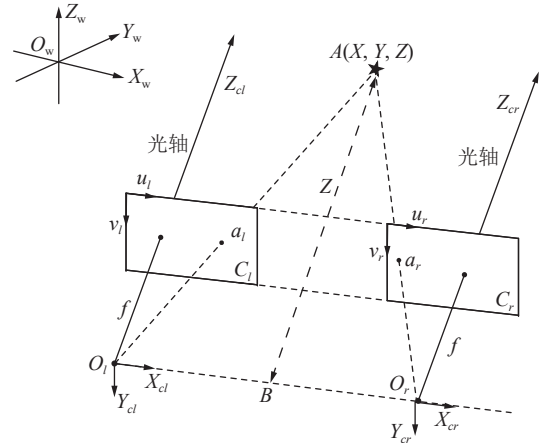


图 4 平行双目视觉模型

Fig.4 The parallel binocular vision model

#### 3.2 基于位置的视觉控制方法

笔者构建的基于位置的视觉控制方法主要流程如下: 钻锚机器人机身布置的双目相机采集顶板钢带图像, 通过图像处理等可解算得到锚钻孔中心空间坐标, 将其作为钻机期望状态; 通过传感器采集各关节运动量, 利用运动学模型解算钻机当前状态; 根据期望状态和当前状态设计视觉控制器, 控制钻臂各关节运动, 当期望状态与当前状态距离  $s_1$  小于设定阈值  $s_{\text{threshold}}$  时, 基于位置的视觉控制过程结束。基于位置的视觉控制方法流程如图 5 所示。

设定  $O_w X_w Y_w Z_w$  为巷道坐标系也是世界坐标系;  $O_r X_r Y_r Z_r$  为钻锚机器人机身坐标系;  $O_l X_l Y_l Z_l$  为双目相机坐标系;  $O_{c2} X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$  为单目相机坐标系;  $O_e X_e Y_e Z_e$  为末端执行器钻机坐标系;  $O_z X_z Y_z Z_z$  为钻臂基坐标系;  $P$  为钢带上锚钻孔中心。

通过前文所述方法可以确定空间点  $P$  在双目相机坐标系下的空间坐标为  $P_{c1}(X, Y, Z)$ , 根据钻锚机器人结构可标定得到双目相机坐标系到钻锚机器人机身坐标系的转换矩阵  $T_{c1}^r$ ; 钻臂基坐标系到钻锚机器人机身坐标系的转换矩阵  $T_z^r$ ; 通过钻锚机器人机身定位方法可以得到钻锚机器人机身坐标系到巷道坐标系的转换矩阵  $T_r^w$ ; 利用钻臂各关节布置的传感器数据及运动学分析可得到末端执行器坐标系到钻臂基坐标系的转换矩阵  $T_e^z$ 。因此, 锚钻孔中心  $P$  在巷道坐标系

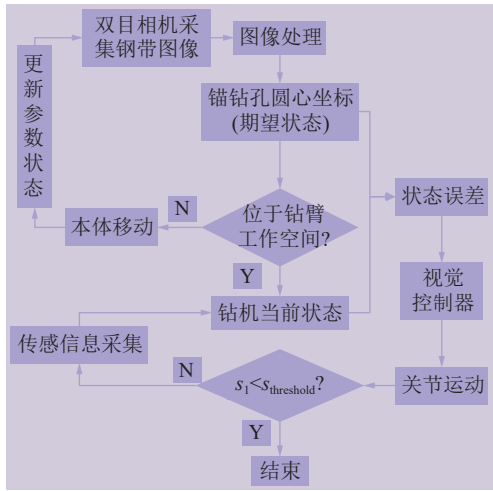


图 5 基于位置的视觉控制方法流程

Fig.5 The flow of position-based visual control method

下的坐标为

$$p_d = P_w = T_r^w T_{c1}^r P_{c1} = (p_{dx}, p_{dy}, p_{dz}) \quad (5)$$

末端执行器到巷道坐标系下的转换矩阵为

$$T_e^w = T_r^w T_z^r T_e^z = \begin{bmatrix} n_c & o_c & a_c & p_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $p_c(p_{cx}, p_{cy}, p_{cz})$  为末端执行器在巷道坐标系下的空间坐标。构建末端执行器当前坐标与期望坐标的偏差为  $e_1 = p_d - p_c = (p_{dx} - p_{cx}, p_{dy} - p_{cy}, p_{dz} - p_{cz})^T$ 。利用偏差  $e_1$  及运动学分析结果可求得到基于视觉特征的末端执行器运动速度  $v_1$ , 以此调整末端执行器接近锚钻孔期望位置。

末端执行器当前位置与期望位置之间的距离阈值  $s_{\text{threshold}}$  的设定尤其重要, 合理的阈值能够保证控制方法由基于位置的视觉控制顺利切换到基于图像的视觉伺服控制方法, 控制末端执行器快速精确对准目标锚钻孔。根据相机成像原理, 可以得到目标物体在相机成像平面的尺寸与物体实际尺寸的比值等于相机焦距与物体到相机距离的比值。

根据目标锚钻孔尺寸和相机参数等解算得到当物体到相机的距离为 41.7 mm 时, 锚钻孔恰好能够完全在成像平面上。为保证在一定扰动因素下, 目标锚钻孔能够完全出现在成像平面上, 给定一定冗余量, 设定为 10 cm。利用上述公式可得, 当物体与相机距离为 10 cm 时, 锚钻孔在相机成像平面上像素大小为 400 pix×400 pix, 对系统扰动有一定的适应性, 且能够保证目标锚钻孔持续在成像平面上, 完成基于图像的视觉伺服控制方法控制机械臂快速精确对准目标锚钻孔。因此, 设定末端执行器当前位置与期望位置之间的距离阈值  $s_{\text{threshold}}$  为 10 cm, 若实际距离  $s_1$  大于 10 cm, 继续循环运动, 若实际距离  $s_1$  小于 10 cm, 则基

于位置的视觉控制系统结束运行。

由于双目视觉定位方法精度受相机标定误差、机器人模型误差等影响较大, 因此基于位置的视觉控制方法难以实现高精度的控制。为实现钻锚机器人钻机的高精度控制, 采用分步视觉伺服控制方法, 基于位置的视觉控制方法实现粗略控制, 在此基础上利用基于图像的视觉伺服控制方法实现钻机精确控制。

### 3.3 基于图像的视觉伺服控制方法

基于图像的视觉伺服控制方法以相机获取图像中提取的特征信息作为反馈信息, 根据当前图像上的特征与期望图像上的特征的偏差设计控制器, 控制机器人末端执行器完成伺服任务。笔者选择锚钻孔外切矩形的 4 个顶点坐标为特征信息, 构建基于图像的视觉伺服控制系统, 基于图像的视觉伺服控制方法如图 6 所示。

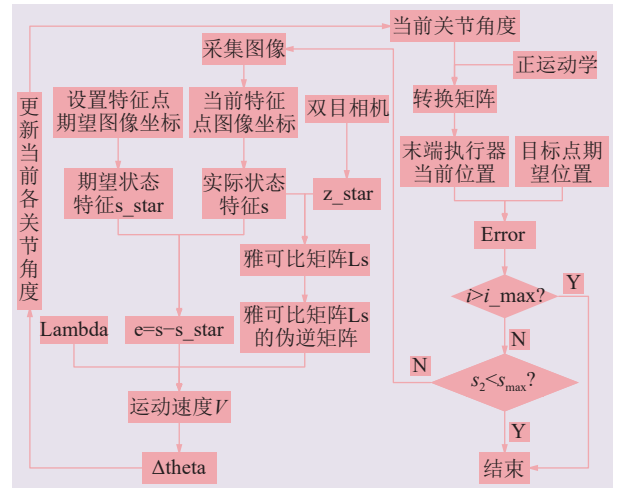


图 6 基于图像的视觉控制方法流程

Fig.6 The flow of image-based visual control method

假设末端执行器上点  $P$  在相机坐标系下空间坐标为  $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ , 其在图像平面上成像点位置为  $P_i(x, y)$ , 由小孔成像原理有如下关系:

$$\begin{cases} x = \frac{X_c}{Z_c} = \frac{u - u_0}{f} \\ y = \frac{Y_c}{Z_c} = \frac{v - v_0}{f} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_0$  和  $v_0$  分别为主点在图像平面上的像素坐标;  $(u, v)$  为点  $P$  在成像平面上的像素坐标。将式 (7) 左右两边同时求导可得:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X}_c}{Z_c} - \frac{X_c \dot{Z}_c}{Z_c^2} = \frac{\dot{X}_c - x \dot{Z}_c}{Z_c} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y}_c}{Z_c} - \frac{Y_c \dot{Z}_c}{Z_c^2} = \frac{\dot{Y}_c - y \dot{Z}_c}{Z_c} \end{cases} \quad (8)$$

设相机的线速度和角速度分别为  $v_c = (v_x, v_y, v_z)^T$



和  $\omega_c = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ , 在相机坐标系中, 点  $P$  的位置随时间变化的运动学方程为  $\dot{X} = -v_c - \omega_c X$ , 即有:

$$\begin{cases} \dot{X}_C = -v_x - \omega_y Z_C + \omega_z Y_C \\ \dot{Y}_C = -v_y - \omega_z X_C + \omega_x Z_C \\ \dot{Z}_C = -v_z - \omega_x Y_C + \omega_y X_C \end{cases} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 可得到  $P$  点在图像坐标系运动速度与该点在相机坐标系下运动速度的映射关系, 即:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/Z_1 & 0 & x_1/Z_1 \\ 0 & -1/Z_1 & y_1/Z_1 \\ -1/Z_2 & 0 & x_2/Z_2 \\ 0 & -1/Z_2 & y_2/Z_2 \\ -1/Z_3 & 0 & x_3/Z_3 \\ 0 & -1/Z_3 & y_3/Z_3 \\ -1/Z_4 & 0 & x_4/Z_4 \\ 0 & -1/Z_4 & y_4/Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 y_1 & -1 - x_1^2 & y_1 \\ 1 + y_1^2 & -x_1 y_1 & -x_1 \\ x_2 y_2 & -1 - x_2^2 & y_2 \\ 1 + y_2^2 & -x_2 y_2 & -x_2 \\ x_3 y_3 & -1 - x_3^2 & y_3 \\ 1 + y_3^2 & -x_3 y_3 & -x_3 \\ x_4 y_4 & -1 - x_4^2 & y_4 \\ 1 + y_4^2 & -x_4 y_4 & -x_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

基于图像的视觉伺服控制系统中定义图像特征误差为

$$e_2 = S - S^* \quad (12)$$

式中:  $S$  为当前图像特征值, 即上述锚钻孔外切矩形顶点的图像坐标;  $S^*$  为期望特征值, 式 (11) 可以写成:

$$\dot{e}_2 = L_S v_c = L_S J_r \dot{\theta} \quad (13)$$

式中:  $L_S$  为图像的雅可比矩阵;  $v_c$  为末端执行器的速度;  $J_r$  为机器人雅可比矩阵;  $\theta$  为关节运动量。在实际钻臂控制系统中, 控制器输出为关节角速度, 因此需要解算钻臂末端运动速度与钻臂关节速度的映射关系。

矩阵  $J = L_S J_r$  称为复合雅可比矩阵, 描述了钻臂关节角速度与图像特征值变化速度之间的映射关系。

为保证图像特征误差以指数解耦下降, 则  $\dot{e}_2 = -\lambda e$ , 有:

$$v_c = -\lambda L_S^{-1} e_2 \quad (14)$$

如果矩阵  $L_S$  不是方阵, 那么  $L_S^{-1}$  不存在。如果矩阵  $L_S$  行数大于列数, 那么  $\dot{S} = L_S v_c$  可能无解。如果矩阵  $L_S$  行数小于列数, 那么  $L_S^{-1}$  存在多解, 利用摩尔-彭罗斯伪逆求解, 则有:

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T \quad (15)$$

因此, 实际系统的控制律为  $\dot{\theta} = -\lambda J^+ e_2$ 。

## 4 实验验证

### 4.1 锚钻孔空间定位实验

为验证笔者所述基于双目视觉的锚钻孔定位方法的可行性和准确性, 在实验室环境下搭建了钻锚机

器实验平台。实验平台如图 7 所示, 主要包括钻锚机器人、双目相机、钢带、临时支护装置、全站仪和定位软件。其中, 锚钻孔均匀分布在钢带上, 直径为 30 mm, 相邻锚钻孔间距为 30 cm。实验前需要对双目相机进行立体标定, 得到相机参数, 同时需要标定双目相机在全站仪中的坐标。

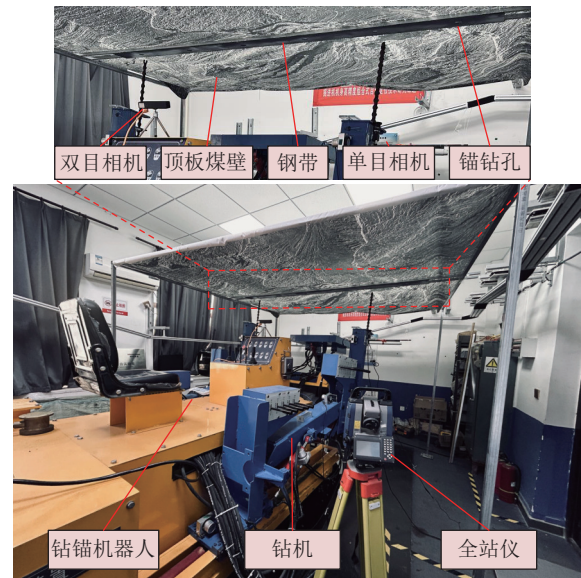


图7 钻锚机器人实验平台

Fig.7 Experimental platform of anchor drilling robot

实验过程中, 双目相机采集顶板钢带图像, 在图像增强的基础上, 利用笔者所述方法解算钢带上锚钻孔中心空间位置, 将其结果作为测量值。利用全站仪测量钢带上锚钻孔空间位置, 由于全站仪测量精度高, 将其所得结果作为真实值与笔者方法所得结果进行对比。调整钢带位置, 在 5 个不同位置进行此操作, 其中相机采集得到一组图像如图 8 所示。实验结果

见表 2, 5 组实验中各个锚钻孔空间位置误差在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  3 个方向上分别在 (4.6 mm, 10.5 mm)、(3.8 mm, 11.7 mm) 和 (4.9 mm, 10.4 mm) 的区间范围内波动, 所

有锚钻孔在 3 个方向上平均误差值分别为 7.5、7.8 和 8.1 mm。锚钻孔定位误差远小于视觉控制设定阈值, 能够满足基于位置视觉控制方法的精度要求。

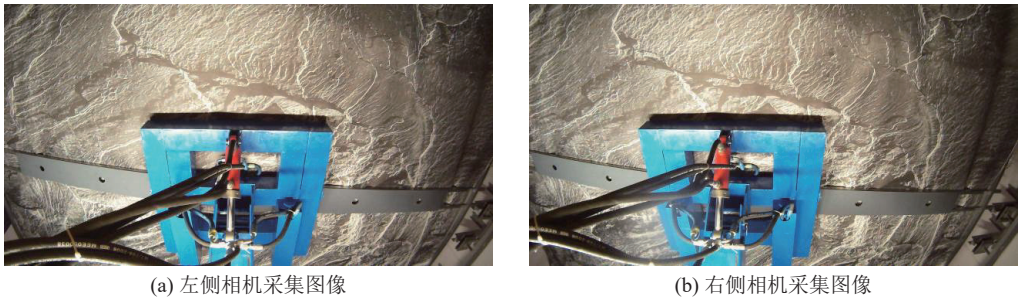


图 8 双目相机采集图像  
Fig.8 Images captured by binocular camera

表 2 不同位置锚钻孔定位结果误差  
Table 2 Error of drilling holes positioning results at different positions

试验组	$\Delta x/\text{mm}$				$\Delta y/\text{mm}$				$\Delta z/\text{mm}$			
	孔1	孔2	孔3	孔4	孔1	孔2	孔3	孔4	孔1	孔2	孔3	孔4
1	5.9	4.9	6.4	5.8	3.8	5.1	5.9	6.2	4.9	6.1	6.2	8.3
2	6.2	5.2	5.7	6.3	5.8	6.4	6.4	5.1	6.3	5.9	7.5	7.8
3	8.5	4.6	8.2	8.9	8.9	5.8	7.9	8.5	7.9	6.2	7.9	9.3
4	8.9	6.8	9.8	10.2	11.2	8.5	10.2	9.2	9.3	7.9	8.9	10.2
5	9.6	9.3	8.9	10.5	9.7	10.2	11.7	10.4	10.4	10.2	10.4	9.8
平均值	7.8	6.2	7.8	8.3	7.9	7.2	8.4	7.9	7.8	7.3	8.2	9.1

4.2 视觉伺服控制系统实验结果与分析

为验证笔者所提分步视觉伺服控制方法的有效性, 同样使用图 7 所示的钻锚机器人实验平台。图中双目视觉系统用于确定锚钻孔空间位置, 同时利用锚钻孔位置信息控制钻臂靠近目标位置, 实现钻臂的粗略控制; 单目视觉系统利用图像特征信息控制钻臂运动, 实现钻臂精确对准锚钻孔中心。钻臂各个关节初始变量值为  $\theta_{\text{init}} = [-60^\circ \ -60^\circ \ 0^\circ \ -30^\circ \ -60^\circ \ -30^\circ]$ , 末端执行器初始位置空间坐标为 (250 mm, -433 mm, 866 mm); 设定末端执行器目标位置空间坐标为 (600 mm, -1 039 mm, 0 mm)。记录基于位置的视觉控制过程各关节量、关节运动速度和末端执行器实时位置与目标位置之间距离等信息, 结果如图 9 所示。

图 9a 表示末端执行器当前位置与目标位置的距离随时间变化情况, 可以看出其距离从起始位置的 1 114 逐渐变小, 在  $t=9.4$  s 时, 距离为 99.7 mm, 首次小于设定阈值 100 mm, 此时钻臂逐渐停止运动, 最终在  $t=11.5$  s 时, 末端执行器当前位置与目标位置的距离为 94.2 mm。

图 9b 和图 9c 分别表示钻臂各关节量和关节速

度随时间变化情况, 可以看出, 当  $t < 9.4$  s 时, 各关节量和关节速度为平滑曲线, 说明关节平稳运动, 当  $t=9.4$  s 时, 末端执行器当前位置与目标位置的距离小于 100 mm, 此后各关节逐渐停止运动, 各个关节速度均缓慢平稳降至 0, 钻臂各关节停止运动, 完成钻臂基于位置的粗略控制。

基于位置的视觉控制方法能够对钻臂粗略控制, 实现钻臂靠近锚钻孔。基于位置的视觉控制过程结束后, 锚钻孔在单目相机的视觉范围内, 以锚钻孔外切矩形 4 个顶点的坐标为特征, 构建基于图像的视觉伺服控制模型, 实现钻臂的精确控制。4 个顶点期望的像素坐标为 (400, 1 200)、(400, 400)、(1 200, 1 200) 和 (1 200, 400), 4 个顶点的当前像素坐标为 (636, 800)、(782, 653)、(782, 946) 和 (929, 800)。记录基于图像的视觉伺服控制过程中 4 个特征点像素坐标, 将其转化为基于图像的视觉伺服控制过程状态变化, 如图 10 所示。

图 10a 为特征误差  $e$  随时间变化情况, 图中可以看出, 4 个特征点在图像坐标系下坐标与期望特征点图像坐标差值随时间逐渐趋近于 0, 在  $t=6.4$  s 时, 特



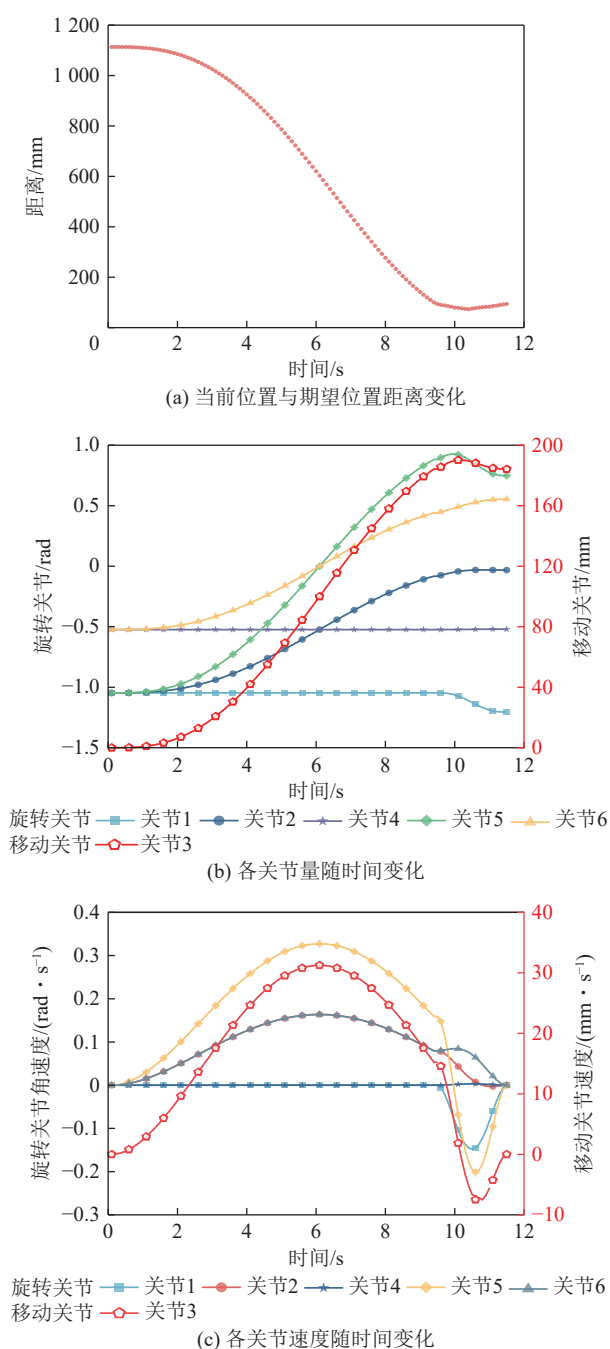


图9 基于位置的视觉控制关节变化状态

Fig.9 Joint state of position-based visual control process

征误差  $e$  小于设定阈值, 基于图像的视觉伺服控制过程结束。图 10b 为在基于图像的视觉伺服控制过程中, 4 个特征点在像素坐标系下的运动轨迹, 图中蓝色和红色五角星分别为 4 个特征点初始位置和期望位置的像素坐标, 连接蓝色和红色五角星的红色点线图表示同一个特征点在视觉伺服过程中的运动轨迹。可以看出, 在基于图像的视觉伺服控制过程中, 被选中的 4 个特征点均能够从初始位置逐渐运动至目标位置, 实现钻臂的精确控制, 快速准确到达目标锚钻孔位置。

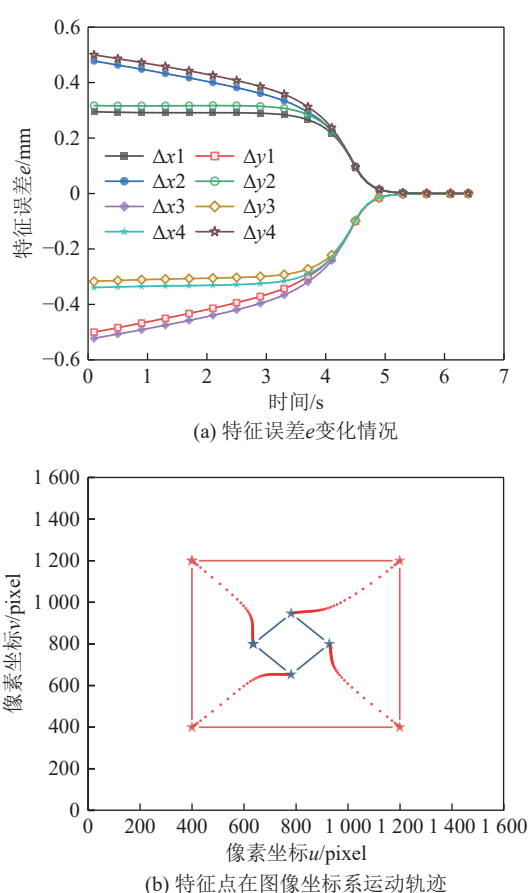


图 10 基于图像视觉伺服控制

Fig.10 Image-based visual servo control

## 5 结 论

1) 构建基于双目视觉测量方法的锚钻孔定位模型, 在三角测量原理的基础上, 通过图像处理等操作实现锚钻孔自动定位, 得到锚钻孔空间位置信息。

2) 在锚钻孔自动定位的基础上, 提出一种基于分步视觉伺服的钻锚机器人控制方法。在锚钻孔定位结果的基础上, 利用基于位置的视觉控制方法实现钻臂接近锚钻孔, 利用基于图像的视觉伺服控制方法实现钻臂自主精确对准锚钻孔, 完成巷道顶板锚固任务。

3) 为了验证笔者所述锚钻孔自动定位方法和分步视觉伺服控制方法的可行性和准确性, 在实验室搭建了实验平台。结果表明, 笔者所述锚钻孔视觉定位方法在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向定位平均误差分别为 7.5、7.8、8.1 mm, 能够满足分步视觉伺服控制的要求。基于分步视觉伺服控制方法的钻臂能够快速准确到达锚钻孔位置。对于提高煤矿支护装备自动化和智能化程度, 解决“采掘失衡”难题具有重要意义。

## 参考文献(References):

- [1] 王虹, 王步康, 张小峰, 等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J].

- 煤炭学报, 2021, 46(7): 2068–2083.
- WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2068–2083.
- [2] 王国法, 杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1–10.
- WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1–10.
- [3] 鲍久圣, 张可琨, 王茂森, 等. 矿山数字孪生 MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 166–177.
- BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects [J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 166–177.
- [4] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状与趋势分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 1–11.
- WANG Bukang. Current status and trend analysis of roadway driving technology and equipment in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 1–11.
- [5] 朱伟, 王虹, 李首滨, 等. 煤矿采掘装备核心控制技术现状和发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 153–160.
- ZHU Wei, WANG Hong, LI Shoubin, et al. Current status and development trend of core control technology for coal mining and tunneling equipment[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 153–160.
- [6] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071–1081.
- KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071–1081.
- [7] 王虹, 王建利, 张小峰. 掘锚一体化高效掘进理论与技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2021–2030.
- WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of efficient roadway advance with driving and bolting integration[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2021–2030.
- [8] 曹现刚, 费佳浩, 王鹏, 等. 基于多机械臂协同的煤矸分拣方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 7–12.
- CAO Xiangang, FEI Jiahao, WANG Peng, et al. Study on coal-gangue sorting method based on multi-manipulator collaboration[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 7–12.
- [9] 翟国栋, 张文涛, 岳中文, 等. 基于双目视觉技术的煤矿救援机器人研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 206–217.
- ZHAI Guodong, ZHANG Wentao, YUE Zhongwen, et al. Research progress of coal mine rescue robot based on binocular vision technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 206–217.
- [10] 李森, 王峰, 刘帅, 等. 综采工作面巡检机器人关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 218–225.
- LI Sen, WANG Feng, LIU Shuai, et al. Study on key technology of patrol robots for fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 218–225.
- [11] 王成军, 王智慧, 金力, 等. 双臂型井下巡检机器人动力学分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40(11): 181–185.
- WANG Chengjun, WANG Zhihui, JIN Li, et al. Study on dynamics of dual-arm underground inspection robots[J]. Coal Technology, 2021, 40(11): 181–185.
- [12] 高佳晨, 马宏伟, 王川伟, 等. 煤矿巷道掘进锚网运输机器人结构设计及运动规划[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 175–180.
- GAO Jiachen, MA Hongwei, WANG Chuanwei, et al. Structure design and motion planning of bolt mesh transport robot for coal mine tunneling[J]. Coal Engineering, 2021, 53(11): 175–180.
- [13] 李世军, 任怀伟, 张德生, 等. 煤矿巷道冲尘机器人关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 86–92.
- LI Shijun, REN Huaiwei, ZHANG Desheng, et al. Research on key technologies of coal mine roadway dust cleaning robot[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 86–92.
- [14] 马宏伟, 孙思雅, 王川伟, 等. 多机械臂多钻机协作的煤矿巷道锚网机器人关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 497–509.
- MA Hongwei, SUN Siya, WANG Chuanwei, et al. Key technology of drilling anchor robot with multi-manipulator and multi-rig cooperation in the coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 497–509.
- [15] 周东旭, 谢明佐, 宣鹏程, 等. 煤矿轻型协作机械臂逆运动学解算与验证[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 791–799.
- ZHOU Dongxu, XIE Mingzuo, XUAN Pengcheng, et al. Inverse kinematics solution and verification of light-duty collaborative manipulator in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 791–799.
- [16] 韩涛, 李静, 黄友锐, 等. 煤矿救援机器人机械臂轨迹规划算法研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(11): 45–52.
- HAN Tao, LI Jing, HUANG Yourui, et al. Research on trajectory planning algorithm of manipulator arm of coal mine rescue robot[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(11): 45–52.
- [17] 孙晓宇, 王恒升, 郭新平, 等. 锚杆钻车串并联冗余机械臂的运动学研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(4): 493–503.
- SUN Xiaoyu, WANG Hengsheng, GUO Xinping, et al. Kinematics study on redundant manipulator with serial-parallel hybrid mechanism of bolter-drilling rig[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(4): 493–503.
- [18] 王鹏, 曹现刚, 马宏伟, 等. 基于余弦定理-PID 的煤矸石分拣机器人动态目标稳态抓取算法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4240–4247.
- WANG Peng, CAO Xiangang, MA Hongwei, et al. Dynamic target steady and accurate grasping algorithm of gangue sorting robot based on cosine theorem-PID[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4240–4247.
- [19] 张君. 基于 WOA-FOPID 算法的钻锚机器人机械臂运动控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 292–302.
- ZHANG Jun. Research on motion control of manipulator of anchor drilling robot based on WOA-FOPID algorithm[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 292–302.
- [20] 刘送永, 徐海乔, 张德义, 等. 多自由度自动喷浆机械臂运动分析及路径优化[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 1079–1088.
- LIU Songyong, XU Haiqiao, ZHANG Deyi, et al. Motion analysis and path optimization of multi-degree-of-freedom automatic shotcrete robot arm[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 1079–1088.

- [21] 马宏伟, 张烨, 王鹏, 等. 多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 427–436.  
MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng, et al. Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 427–436.
- [22] 纪鹏, 宋爱国, 吴常铨, 等. 适用于移动机械手无关节状态反馈情况的基于人-机-机协作的无标定视觉伺服控制[J]. 机器人, 2017, 39(2): 197–204.  
JI Peng, SONG Aiguo, WU Changcheng, et al. Human-robot-robot-cooperation based uncalibrated visual servoing control for mobile robotic manipulators without joint-state feedback[J]. Robot, 2017, 39(2): 197–204.
- [23] 邹焱飏, 王研博, 周卫林. 焊缝跟踪应用的线激光视觉伺服控制系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2689–2698.  
ZOU Yanbiao, WANG Yanbo, ZHOU Weilin. Line laser visual servo control system for seam tracking[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2689–2698.
- [24] 梁喜凤, 彭明, 路杰, 等. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的采摘机械手视觉伺服控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 230–237.  
LIANG Xifeng, PENG Ming, LU Jie, et al. Servo control method of picking manipulator based on adaptive traceless Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 230–237.
- [25] 李静, 黄友锐, 韩涛, 等. 矿用智能巡检机器人无标定视觉伺服控制研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(11): 30–39.  
LI Jing, HUANG Yourui, HAN Tao, et al. Research on uncalibrated visual servo control of mine intelligent inspection robot[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(11): 30–39.
- [26] MA Y Q, LIU X L, ZHANG J, et al. Robotic grasping and alignment for small size components assembly based on visual servoing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11): 4827–4843.
- [27] CHANG W C. Robotic assembly of smartphone back shells with eye-in-hand visual servoing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 102–113.
- [28] 董鹏飞. 基于位置的工业机器人视觉伺服控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.  
DONG Pengfei. Research on position-based visual servo control system of industrial robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [29] KIM S T, FAN M, JUNG S W, et al. External vehicle positioning system using multiple fish-eye surveillance cameras for indoor parking lots[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(4): 5107–5118.
- [30] 谢苗, 李佩达. 无标定六自由度砌砖机械臂视觉伺服控制[J]. 制造业自动化, 2023, 45(10): 129–132, 161.  
XIE Miao, LI Peida. Visual servo control of six degrees of freedom brick masonry manipulator without calibration[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(10): 129–132, 161.
- [31] 赵源深. 西红柿采摘机器人目标识别、定位与控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
ZHAO Yuanshen. Research on target recognition, positioning and control technology of tomato picking robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [32] SHANG W F, REN H, YI Z K, et al. High precision PCB soldering with pin springback compensation by robotic micromanipulation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 28(1): 326–339.
- [33] 张旭辉, 杨红强, 白琳娜, 等. 煤矿掘进工作面低照度视频增强技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 309–316.  
ZHANG Xuhui, YANG Hongqiang, BAI Linna, et al. Research on low illumination video enhancement technology in coal mine heading face[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 309–316.
- [34] YANG W J, ZHANG X H, MA H W, et al. Geometrically driven underground camera modeling and calibration with coplanarity constraints for a boom-type roadheader[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(9): 8919–8929.
- [35] YANG W J, ZHANG X H, MA H W, et al. Non-central refractive camera calibration using co-planarity constraints for a photogrammetric system with an optical sphere cover[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 139: 106487.