

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于视觉反馈的多机器人自重构系统研究

周游, 双丰, 李金科, 孙健铨

引用本文:

周游,双丰,李金科,孙健铨. 基于视觉反馈的多机器人自重构系统研究[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2127–2133.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0286>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 安全平滑的改进时间弹性带轨迹规划算法

Safe and smooth improved time elastic band trajectory planning algorithm

控制与决策. 2022, 37(8): 2008–2016 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0068>

#### 书法机器人研究综述

Survey of calligraphy robots

控制与决策. 2022, 37(7): 1665–1674 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0132>

#### 旋翼无人机环境覆盖与探索规划方法综述

A survey on coverage and exploration path planning with multi-rotor micro aerial vehicles

控制与决策. 2022, 37(3): 513–529 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1751>

#### 基于接触状态感知发育的机器人柔性装配方法

Flexible assembly method based on contact state perception development

控制与决策. 2021, 36(4): 876–884 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1079>

#### 移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

# 基于视觉反馈的多机器人自重构系统研究

周游<sup>1,2</sup>, 双丰<sup>1†</sup>, 李金科<sup>2</sup>, 孙健铨<sup>2</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 南宁 530000; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 在执行特种任务时, 为了能够实现自重构功能以适应复杂地形环境, 多机器人必须拥有一套安全高效的自主对接分离系统. 鉴于此, 提出一种基于视觉反馈实时获取机器人相对位姿信息的方法, 使控制机器人按照规划轨迹进行自主对接. 首先, 调整机器人对接尾座到达水平状态; 然后, 利用摄像头捕获到的标记板解算机器人的位姿信息; 最后, 控制机器人按照规划轨迹进行对接操作. 独特的分离系统在多机器人出现故障时可做到实时分离, 抛弃故障单元. 经实验验证, 自重构系统对接成功率高达 97.3% 以上, 具有良好的鲁棒性.

**关键词:** 自主对接; 多机器人; 视觉定位; 运动规划; 位姿估计

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0286

引用格式: 周游, 双丰, 李金科, 等. 基于视觉反馈的多机器人自重构系统研究[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2127-2133.

## Multi-robot self-reconfigurable systems based on visual feedback

ZHOU You<sup>1,2</sup>, SHUANG Feng<sup>1†</sup>, LI Jin-ke<sup>2</sup>, SUN Jian-quan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China; 2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** When performing special tasks, in order to realize the self-reconfiguration function to adapt to the complex terrain environment, multi-robots must have a safe and efficient autonomous docking and separation system. Therefore, this paper proposes a method to obtain the relative pose information of the robot in real-time based on visual feedback, and control the robot to autonomously dock according to the planned trajectory. Firstly, the docking tailstock of the robot is adjusted to reach a horizontal state, then the marker board captured by the camera is used to calculate the pose information of the robot, and finally the robot is controlled to perform docking operations according to the planned trajectory. The unique separation system can achieve real-time separation and abandon the faulty unit when the multi-robot fails. Experiments verify that the docking success rate of the self-reconfigurable system is as high as 97.3%, which has good robustness.

**Keywords:** autonomous docking; multi-robot; visual positioning; motion planning; pose estimation

## 0 引言

随着科技的进步, 机器人得到了快速发展, 并且在各领域得到了广泛应用, 如工业制造、智能巡检、野外探测、家居服务等<sup>[1-3]</sup>. 本文针对反恐排爆、建筑废墟、丛林战场等复杂环境, 利用仿生移动机器人<sup>[4]</sup>和多传感器融合<sup>[5]</sup>等技术手段, 实现包括废墟、垂直障碍、连续楼梯等地形下的机器人高效移动与越障、机器人故障自恢复与自重构等功能<sup>[6-8]</sup>, 以提高指挥中心对战役现场情况侦测与指挥, 减少人员伤亡与损失, 提升我国装备的技术水平和自主创新能力, 满足

国家重大需求.

对于多机器人在各种复杂环境下顺利执行任务, 机器人自重构技术显得尤为重要. 学者们对机器人自重构对接分离技术已经进行了多年研究, 使其在海陆空领域均有广泛应用<sup>[9-11]</sup>, 如自主水下机器人、无人水面船艇、野外侦察机器人、无人机等. Yan 等<sup>[12]</sup>提出利用超短基线定位系统 (USBL) 声学引导的方案, 实现水中 3D 路径规划, 提高 AUV 动态入坞能力. Lee 等<sup>[13]</sup>研究了利用激光雷达和视觉传感器完成对船坞定位与对接, 在水面上 ASV 进坞成功率大

收稿日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-06-03.

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B090917002); 中国科学院科技服务网络计划 (STS 计划) 项目 (KFJ-STG-QYZX-095).

责任编辑: 黄永安.

†通讯作者. E-mail: fshuang@gxu.edu.cn.

大提高. Tsai 等<sup>[14]</sup>研究了基于视觉的系绳辅助算法,将偏离的子体机器人自动停靠在母体身上. Saldaña 等<sup>[15]</sup>研究了无人机群使用被动机制进行对接,基于磁性矩阵对接和断开的连接器,在全局相机的视野下能够完成各种组合操作. 以上案例都很成功,但由于运动学和应用上的差异,所给出的结果不能直接应用于地面移动机器人.

地面移动机器人自重构问题是本文所要研究的重点. 现有的模式一般为单个移动机器人对接基站,即在基站设定标定物或传感器以便机器人识别,然后通过算法得出相对位姿,调整姿态,向基站移动,实现对接. Doumbia 等<sup>[16]</sup>提出使用3个红外发射器定义全局导航空间,利用机器人内部反射镜之间的最佳位置和方向角,实现进坞充电. Zhang 等<sup>[17]</sup>提出红外加超声波组合的定位方法,实现移动机器人自动对接充电. Liu 等<sup>[18]</sup>研究展现了模块化机器人强大的自重构修复能力,但每个模块都需要配置被动标志球,配合红外相机作三维运动捕捉分析完成自重构修复操作.

以上地面移动机器人的研究,都是在相对单一的环境下完成静态对接充电及自修复等任务. 鉴于此,本文提出一种基于视觉反馈实时获取机器人相对位姿信息的方法,使控制机器人按照规划轨迹进行自主对接. 首先,调整机器人对接底座到达水平状态;然后,利用摄像头捕获到的标记板解算机器人的位姿信息;最后,控制机器人按照规划轨迹进行对接操作. 独特的分离系统在多机器人出现故障时可做到实时分离,抛弃故障单元. 经实验验证,自重构系统对接成功率高达97.3%以上,具有良好的鲁棒性.

## 1 机器人和自重构系统配置

### 1.1 机器人系统

以仿生学依据蜈蚣多节体结构为基础,针对蜈蚣的稳定性高、隐蔽性好且可以适应各种地形的优势,研究仿生全地形多节移动机器人. 通过衍生化设计方法,研究高效行星轮为核心的节体单元;以单元快速分离、重构为目的,利用双向快速主动分离设计,构建多节体躯长可调式自重构拼接系统. 系统模仿蜈蚣结构的模块化机器人如图1所示. 多节模块机器人两两之间可执行对接分离功能,以满足任务需要.



图1 仿蜈蚣结构模块机器人

### 1.2 自重构系统配置

实现前机器人与后机器人之间的对接,需要知道两车机器人的相对位姿关系信息,当任务需要时,前后两车机器人会进行对接从而连成一体. 前机器人对接尾座结构姿势有上扬、水平及下落3种姿势,如图2所示,该结构具有对接和分离两种执行功能.

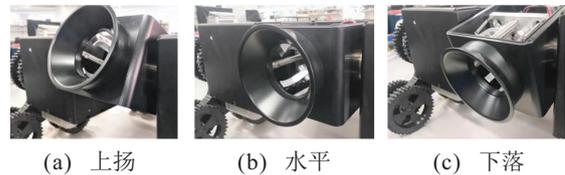


图2 尾座姿态

后机器人前端有对接杆,杆的最前面突出的圆球为对接头,在对接后起到连接两车的作用. 杆的中间为空心,有一根传输轴前后伸缩,该传输轴为两车机器人执行分离动作的关键结构. 对接杆结构如图3所示.

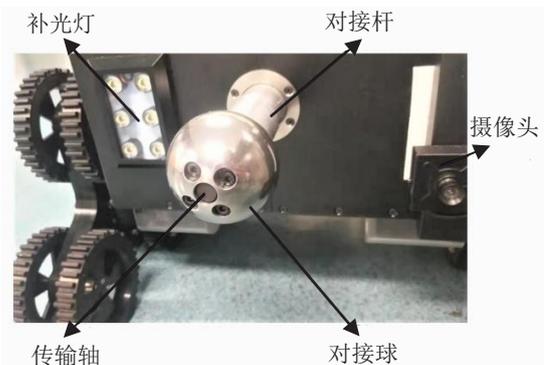


图3 对接杆结构

对接系统的结构设计能够实现一定的容错率,使两车机器人即使在复杂环境下对接,底盘移动机构出现不平时,也能够顺利执行对接任务,对接结构系统更加可靠. 机器人对接效果如图4所示.



图4 机器人对接效果

## 2 基于视觉的自主对接设计

本节提出多机器人之间一种基于视觉的自主对接和分离策略,主要讨论基准标记定位算法、机器人位姿估计、对接分离控制及机器人损伤自修复策略.

### 2.1 基准标记定位算法

本文采用标记定位方法,基本原理是从摄像头获得图像中提取的特征点,确定棋盘格上对应特征点的坐标信息,经过矩阵计算得出相对位姿信息. 这之前

需要了解世界坐标系、相机坐标系、像素坐标系和平面坐标系的定义才能推导出几大坐标系之间的转换关系,具体投影过程如图5所示。

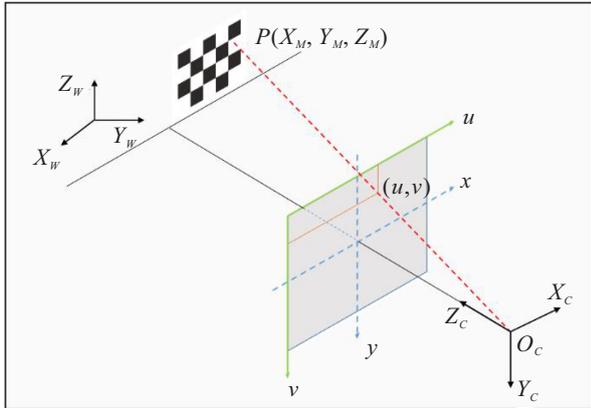


图5 投影过程

根据投影原理,将一个三维世界坐标转换到像素二维平面,转换公式如下所示:

$$sm' = A[R|t]M'. \quad (1)$$

具体展开为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中:  $(X_W, Y_W, Z_W)$  为世界空间中 3D 点的坐标,  $(u, v)$  为投影点(以像素为单位)的坐标,  $A$  为相机矩阵或内部参数矩阵,  $R$  和  $t$  分别为旋转矩阵和平移矩阵,  $(c_x, c_y)$  为通常位于图像中心的基准点,  $(f_x, f_y)$  为以像素单位表示的焦距。

依据针孔摄像头模型,利用透视变换将 3D 点投影到图像平面中形成场景视图,其定位算法流程如图 6 所示。

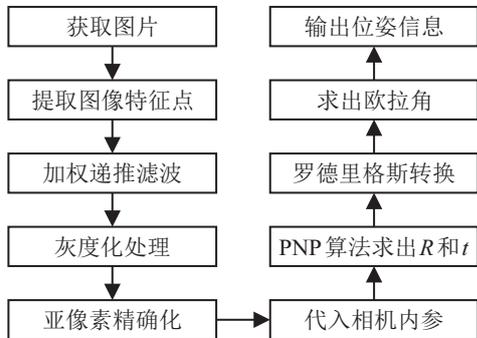


图6 标记板定位算法流程

在提取特征点的过程中,由于相机噪声问题,导致提取出的特征点不稳定,为此引入加权递推滤波算法加以改善.对采集到的特征点进行平滑处理,同时

兼顾其灵敏度,对不同时刻的数据加以不同的权.滤波策略如下所示:

$$\Psi_n = \frac{1}{\sum_{i=1}^k a_i} (a_1 x_n + a_2 x_{n-1} + \dots + a_k x_{n-k}). \quad (3)$$

其中:  $a_i$  为加权值,  $k$  为数据递推的个数,  $x_n$  为特征点测量值,  $\Psi_n$  为滤波后的输出值。

## 2.2 机器人位姿估计

位姿估计可以预测需要对接的两机器人的相对位姿关系.在该系统中,棋盘格标记板作为后机器人的识别目标.为了增加标记板的识别距离,标记板规格尺寸设计为  $120 \times 100 \text{ mm}$ ,单个方格尺寸  $20 \times 20 \text{ mm}$ ,特征点规格数为  $3 \times 4$ ,棋盘格标记板安置于机器人尾座部位.此外,CMOS摄像头的分辨率为  $640 \times 480$ ,帧速率 30 帧/秒。

摄像头安装在机器人前端部位,用于识别提供前机器人的相对位置.对接系统有 4 个坐标系:后机器人坐标系  $(X_R, Y_R, Z_R)$ 、相机坐标系  $(X_C, Y_C, Z_C)$ 、标记板坐标系  $(X_M, Y_M, Z_M)$ 、前机器人坐标系  $(X_F, Y_F, Z_F)$ .图 7 展示了前后机器人、摄像头与标记板的坐标关系.具体位姿关系的转换如下所示:

$$\begin{cases} [X_R \ Y_R \ Z_R]^T = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T + [X_C \ Y_C \ Z_C]^T, \\ [X_F \ Y_F \ Z_F]^T = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T + [X_C \ Y_C \ Z_C]^T, \\ [X_R \ Y_R \ Z_R]^T = [R \ | \ t][X_F \ Y_F \ Z_F]^T. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$  为摄相机与后机器人中心之间的平移矩阵,  $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$  为标记板与前机器人中心之间的平移矩阵。

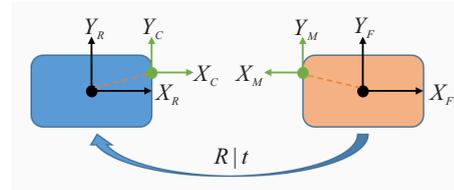


图7 前后机器人、相机和标记板坐标关系

PnP 算法利用三维空间点坐标及其二维投影位置估计相机的位姿,求解 3D-2D 点对运动关系.首先将相机内参提前标定好,然后通过 PnP 算法求解相机外参,即式(1)中的  $R$ (旋转矩阵)和  $t$ (平移矩阵).其中:平移矩阵由  $3 \times 1$  向量  $[X_t, Y_t, Z_t]^T$  表示,旋转向量  $r^T = [r_x, r_y, r_z]^T$  包含机器人的角度方位信息.利用罗德里格斯公式,将其转换成旋转矩阵,转换方法为

$$\begin{aligned} \theta &\leftarrow \text{norm}(r), r \leftarrow r/\theta, \\ R &= \cos \theta I_{3 \times 3} + (1 - \cos \theta) r r^T + \end{aligned}$$

$$\sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为了方便计算前机器人的姿态角  $\text{roll}(\psi_{\text{rob}})$ 、 $\text{pitch}(\varphi_{\text{rob}})$ 、 $\text{yaw}(\theta_{\text{rob}})$ , 令  $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ , 具体计算如下:

$$\psi_{\text{rob}} = \arctan\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right), \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{rob}} = \arctan\left(\frac{-r_{31}}{\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}}\right), \quad (7)$$

$$\theta_{\text{rob}} = \arctan\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right), \quad (8)$$

其中  $Z_t$  和  $X_t$  分别为机器人经过旋转后到对接平台的垂直和水平距离. 相机捕获到标记板后, 计算前机器人的相对位置信息, 然后进行运动规划, 进一步执行对接任务.

### 2.3 对接控制系统和分离控制系统

对接控制系统由4部分组成: 尾座调整、机器人逼近、姿势调整 and 对接, 具体流程如图8所示.

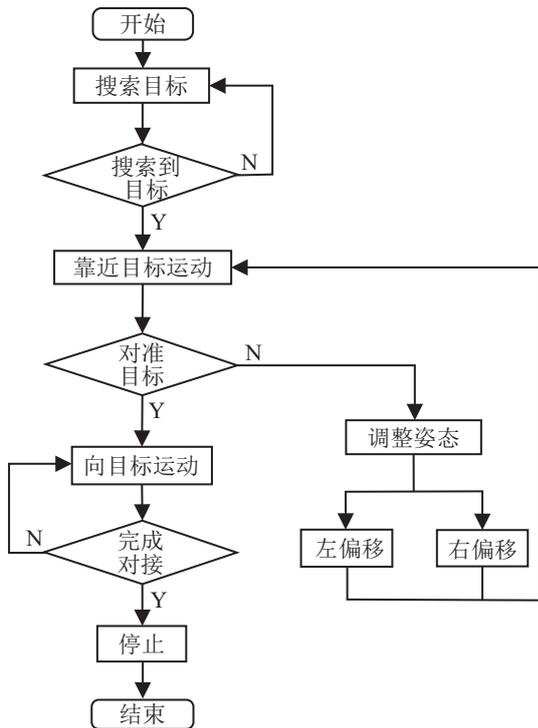


图8 对接流程

多节机器人要求具备攀爬障碍物的功能, 攀爬时前机器人和后机器人将不在同一水平面上, 所以将对接尾座设计为可自由旋转. 执行对接工作时, 要确保机器人尾座结构与后车水平, 基于惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU), 机器人可实时获取自身的姿态信息. 前机器人自身姿态角为  $R_F(\text{pitch},$

$\text{yaw}, \text{roll})$ , 后机器人自身姿态角为  $R_R(\text{pitch}, \text{yaw}, \text{roll})$ , 尾座旋转的位置信息由绝对编码器提供. 两机器人处于同一水平面且对接尾座的状态处于水平时, 编码器的绝对位置角度为  $\delta_0$ , 编码器反馈的实时状态角度为  $\delta_1$ . 由此可知, 两机器人同在水平面上时, 尾座旋转电机需要将尾座旋转的角度  $\Delta\delta$  与  $\delta_1$ 、 $\delta_0$  之间的关系为

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_0. \quad (9)$$

如果前机器人处于斜坡状态, 则需要将对接尾座旋转至初始化状态, 即  $\delta_1 = \delta_0$ ,  $\Delta\delta$ 、 $R_F(\text{pitch})$  与  $R_R(\text{pitch})$  之间的关系为

$$\Delta\delta = R_F(\text{pitch}) - R_R(\text{pitch}). \quad (10)$$

由摄像头获取前机器人位姿信息后, 前机器人A向后机器人B逼近, 直至到达两车机器人的轴线交点处, 机器人A旋转调整方向到与轴线一致, 进行逼近直至对接. 为保证机器人对接安全, 设定安全距离  $H = 15 \text{ cm}$ . 当两车机器人相距  $15 \text{ cm}$  时, 机器人停止移动, 此时对接杆开始运作伸向对接口进行对接, 具体对接方案如图9所示.

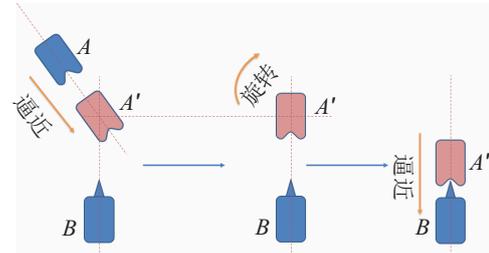


图9 对接方案

在对接过程中, 设计相应优化方案缩减机器人对接时间. 机器人运动速度  $V_{\text{rob}}$  与纵向距离  $Z_t$  以及横向偏移距离  $X_t$  之间关系如下:

$$\begin{cases} V_{\text{rob}} = (\alpha\Delta l + \beta\Delta\phi)v_0 + v_0, \\ \Delta l = Z_t - Z_0, \\ \Delta\phi = X_t - X_0. \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别为纵向距离  $Z_t$  和横向距离  $X_t$  上的权重,  $Z_0$  和  $X_0$  分别为对应的安全距离阈值.

分离控制系统有两种模式: 前机器人主动分离和后机器人主动分离. 大部分自重构机器人在作分离控制时结构都比较单一, 只设计了单向分离, 一旦分离系统出现故障便无法进行自重构操作. 本文所研究机器人考虑在野外运行, 地形环境比较复杂, 难免会有单元出现故障, 这时便需要抛弃故障单元. 如果前机器人A出现故障, 则后机器人B主动运行分离控制; 如果后机器人B出现故障, 则前机器人A主动

运行分离控制. 具体分离方案如图10所示.

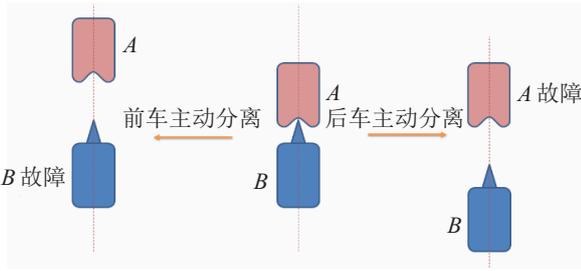


图10 分离方案

### 2.4 机器人损伤自修复策略

无论是机器人自重构还是损伤自修复,都是建立在对接和分离的基础上的,其损伤自修复实现效果如图11所示.

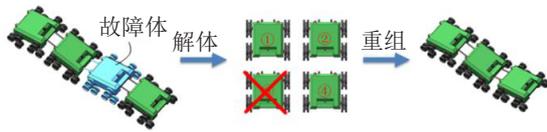


图11 机器人损伤自修复效果

由图11可知,机器人损伤自修复概念的具体实现包含两个过程,即解体与重组. 通过抛弃故障体机器人,控制好机器人进行自重构并继续执行任务. 机器人损伤自修复控制方案如图12所示.

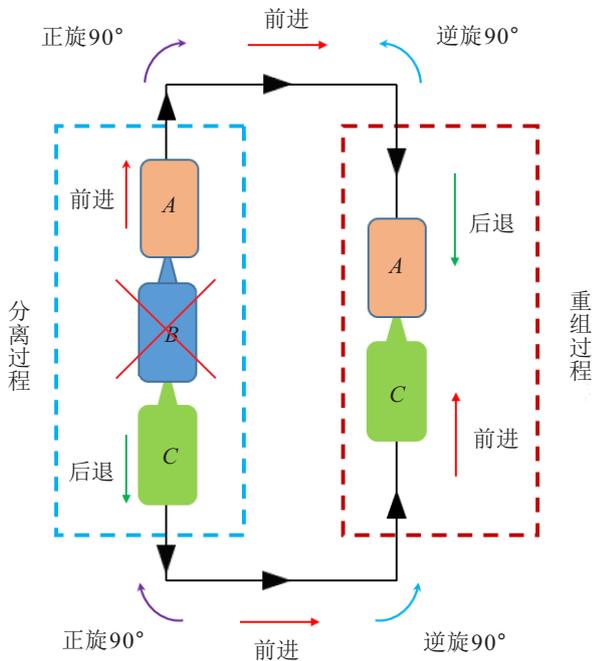


图12 机器人损伤自修复控制方案

由图12可见,当A、B、C三个机器人一起执行任务时,B机器人突然发生故障,为了多节省机器人能够继续执行任务,需要对B机器人进行抛弃处理,由剩下的A、C机器人进行自重构重组继续执行任务. 整个控制过程分为分离和重组,分离阶段可以体

现出本文设计的双向分离解锁的优势. 如果是单向解锁,则B机器人必然存在解锁机构,而B机器人故障会导致整个分离控制失败,此时双向解锁设计可以避免该情况发生,由A、C机器人执行分离工作即可.

首先对机器人A、C进行解锁操作,分离解锁成功后A机器人向前移动 $k$  cm,C机器人向后移动 $k$  cm,同方向顺时针旋转 $n^\circ$ ,再继续前进 $m$  cm确保完全错开故障B机器人;然后两机器人反方向旋转 $n^\circ$ ,还原初始状态方向;最后进行对接,根据自重构控制方案完成机器人损伤自修复的实现.

### 3 实验结果和分析

机器人平台系统如图13所示,可满足实验运动模式. 这种多机器人的对接系统是执行攀爬和跨越沟壑任务的前提,而分离系统是执行故障机器人抛弃重组的关键. 进行多次实验以测试对接分离系统的可靠性.

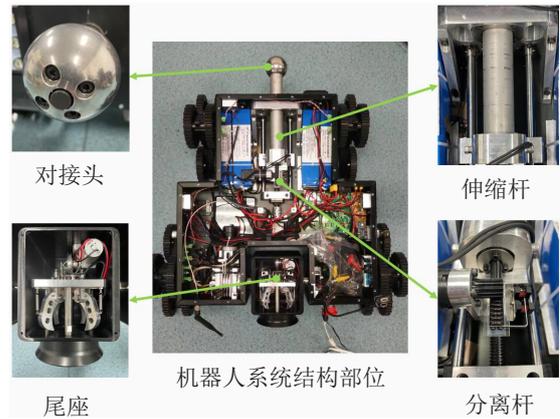


图13 机器人实验平台系统

为检验滤波效果的稳定性,图像滤波需要采集不同方位的视图,选取6个视角如图14所示. 对图像进行特征点的提取,同时对比原始数据与滤波后的数据,结果如表1所示. 由表1可见,所使用的加权递推滤波方法对标记板进行6个不同方位的识别测量,相对于原始数据,方差稳定性提高了1个数量级,这为后面机器人的自重构运动控制作了很好的优化. 滤波效果如图15所示,可见滤波后的数据相对于原始数据鲁棒性更好.

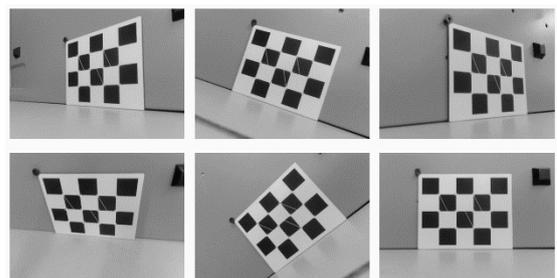


图14 标记板视角

表1 滤波算法实验记录

方位编号	原始数据 / pix		滤波数据 / pix	
	均值	方差	均值	方差
1	1.53e+02	7.34e-04	1.53e+02	6.80e-05
2	3.63e+02	1.05e-03	3.63e+02	8.40e-05
3	2.05e+02	8.68e-04	2.05e+02	8.60e-05
4	1.95e+02	1.43e-03	1.95e+02	1.30e-04
5	2.09e+02	3.50e-04	2.09e+02	3.60e-05
6	4.46e+02	8.26e-04	4.46e+02	9.00e-05
平均值		8.76e-04		8.23e-05

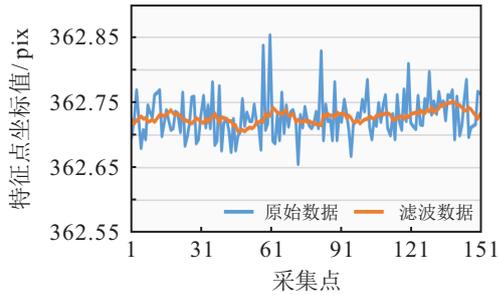


图15 滤波效果

当机器人执行自重构对接操作时,由于不同时刻两机器人位置不同,对接的时间也会有所不同,尤其是在复杂环境下.因此,自重构对接实验设计包含横向与纵向的实验检测,共设置15个不同的开始位置点,如图16所示.两机器人的位置分布中圆弧半径为 $R = 80\text{ cm}$ ,渐变距离为 $L = 20\text{ cm}$ ,姿态渐变角度为 $\theta = 15^\circ$ .

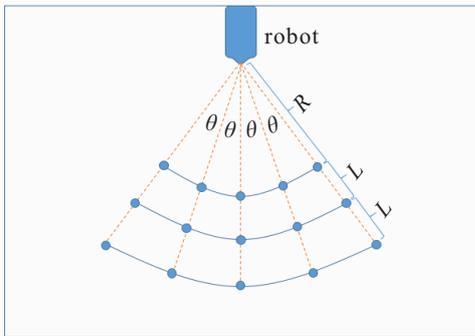


图16 不同起始点对接

对接实验共设置15个测试点,每个测试点重复10次实验,共重复150次,成功对接146次,数据结果如图17所示.

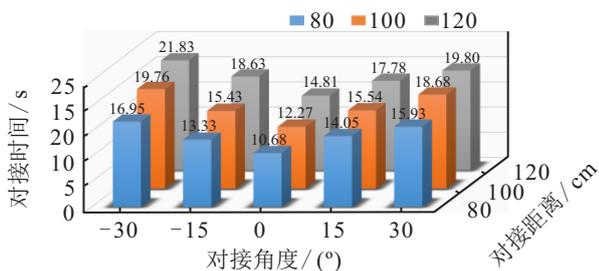


图17 机器人对接时间位姿关系

由图17可知,对接的平均时间和成功率与起始位姿有关.前机器人和后机器人在同一条水平线上,当姿态角一致时,对接所用的时间最短,成功率最高.距离越远,对接时间越慢,摄像头越不易捕捉到标记板,最终导致无法进行对接工作.机器人对接过程如图18所示.

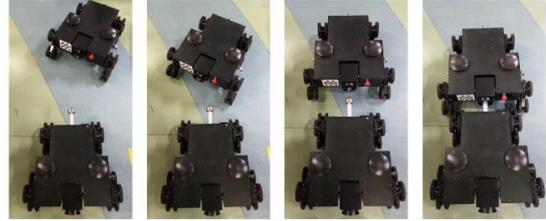


图18 机器人对接过程

分离控制采用双向解锁结构,实验环节较为简单,分别测试抱闸和传输轴推杆解锁,具体过程如图19所示,实验数据如表2所示.

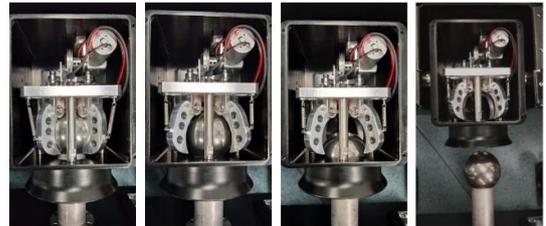


图19 机器人分离局部图

表2 分离解锁耗时数据表

分离模式	平均耗时/s	实验次数
抱闸解锁	2.63	10
推杆解锁	2.27	10

由表2可知,抱闸和推杆解锁平均耗时都很短,均能满足在5s内分离多机器人的设计要求,因此机器人双向解锁可靠性较高.

为验证机器人损伤自修复方案的可行性,首先控制两个完好机器人分别前进和后退20 cm,顺时针旋转90°,后继续前进100 cm完全错开中间的故障机器

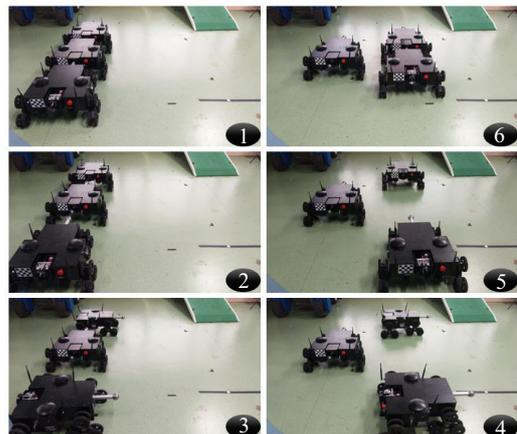


图20 机器人损伤自修复过程

人;然后逆时针旋转 $90^\circ$ 还原初始方向;最后利用自重构对接方案,完成两机器人自重构对接,继续执行任务.实验过程如图20所示,运行数据如表3所示.

表3 机器人损伤自修复耗时数据表

实验名称	平均耗时/s	实验次数
损伤自修复	44.09	10

由表3可知,该损伤自修复方案满足60s内机器人分离后重组操作的设计要求.机器人损伤自修复方案的设计经10组实验测试均成功完成,表明该方案简单有效.

## 4 结论

为了实现多机器人自重构功能,本文提出了一种基于视觉反馈实时获取机器人相对位姿信息的方法,该方法可使机器人按照规划轨迹进行自主对接.通过实验表明,机器人对接控制总成功率高达97.3%,机器人双向分离控制和损伤自修复控制经多次实验验证均能满足设计要求.在复杂场景下,标记板上的光线分布不均匀或者出现光斑都会增加摄像头的识别以及算法的处理难度,该问题有待进一步研究.

## 参考文献(References)

- [1] 董文清. 智能机器人的现状与发展[J]. 机械制造, 2019, 57(1): 36-38.  
(Dong W Q. Present status and development of intelligent robot[J]. Machinery, 2019, 57(1): 36-38.)
- [2] 王斐, 梁宸, 韩晓光, 等. 基于焊件识别与位姿估计的焊接机器人视觉引导[J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 1873-1878.  
(Wang F, Liang C, Han X G, et al. Visual guidance of welding robot based on weldment recognition and pose estimation[J]. Control and Decision, 2020, 35(8): 1873-1878.)
- [3] He W, Li Z J, Chen C L P. A survey of human-centered intelligent robots: Issues and challenges[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 602-609.
- [4] Yang D F, Wang R H, Lu Y P. Research and design of multi-joint bionic robot[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631(3): 032012.
- [5] Yang G Z, Andreu-Perez J, Hu X P, et al. Multi-sensor fusion[C]. Body Sensor Networks. London: Springer, 2014: 301-354.
- [6] Liu C Y, Liu J G, Moreno R, et al. The impact of module morphologies on modular robots[C]. The 18th International Conference on Advanced Robotics. Hong Kong, 2017: 237-243.
- [7] Walter J E. Sensor-driven algorithm for self-reconfiguration of modular robots[C]. International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. Delft, 2018: 1-7.
- [8] Casal A, Yim M H. Self-reconfiguration planning for a class of modular robots[C]. Proceedings Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems II. Piscataway: IEEE, 1999, 3839: 246-257.
- [9] Ylmaz Ç, Ahska K, Leblebiciolu M K. Parallel docking problem for unmanned surface vehicles[C]. The 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore, 2018: 744-749.
- [10] Nguyen T M, Nguyen T H, Cao M Q, et al. Integrated UWB-vision approach for autonomous docking of UAVs in GPS-denied environments[C]. International Conference on Robotics and Automation. Montreal, 2019: 9603-9609.
- [11] Quann M, Ojeda L, Smith W, et al. An energy-efficient method for multi-robot reconnaissance in an unknown environment[C]. American Control Conference. Seattle, 2017: 2279-2284.
- [12] Yan Z P, Gong P, Zhang W. Dynamic docking technology between AUV and mobile mothership[C]. Chinese Control and Decision Conference. Hefei, 2020: 3045-3049.
- [13] Lee J, Woo J, Kim N. Vision and 2D LiDAR based autonomous surface vehicle docking for identify symbols and dock task in 2016 maritime robot challenge[C]. IEEE Underwater Technology. Busan, 2017: 1-5.
- [14] Tsai D, Nesnas I A D, Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013: 2834-2841.
- [15] Saldaña D, Gupta P M, Kumar V. Design and control of aerial modules for inflight self-disassembly[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3410-3417.
- [16] Doumbia M, Cheng X, Havyarimana V. An auto-recharging system design and implementation based on infrared signal for autonomous robots[C]. The 5th International Conference on Control, Automation and Robotics. Beijing, 2019: 894-900.
- [17] Zhang J Z, Cai L M, Chu Y Y, et al. A sectional auto-docking charging control method for the mobile robot[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, 2019: 330-335.
- [18] Liu C, Whitzer M, Yim M. A distributed reconfiguration planning algorithm for modular robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 4231-4238.

## 作者简介

周游(1993—),男,硕士生,从事机器人控制系统设计的研究, E-mail: youzhou8@qq.com;

双丰(1973—),男,教授,博士生导师,从事智能移动机器人、多维力传感器等研究, E-mail: fshuang@gxu.edu.cn;

李金科(1991—),男,博士生,从事机器人控制系统设计的研究, E-mail: jk.li@siat.ac.cn;

孙健铨(1985—),男,工程师,从事机器人机械设计与控制系统设计的研究, E-mail: jq.sun@siat.ac.cn.