

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

子母式机器人系统的设计与协调控制研究

作者姓名: 赵鹏

指导教师: 徐德 研究员 中国科学院自动化研究所

曹志强 副研究员 中国科学院自动化研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 控制理论与控制工程

培养单位: 中国科学院自动化研究所

2015 年 04 月

Research on Design and Coordinated Control
of the Marsupial Robotic System

By

Peng Zhao

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Engineering

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

April, 2015

独创性声明

本人声明所提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。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地说明并表示了谢意。

签名: _____ 日 期: _____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院自动化研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院自动化研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布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。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名: _____ 导师签名: _____ 日 期: _____

摘要

子母式机器人系统通过结合母机器人的运送能力和子机器人的灵活运动，实现对环境适应性的提升，并可有效拓展工作空间，在军事、救灾救援、危险品处理、环境探测等方面具有广阔的应用前景。本文针对子母式机器人系统的设计与协调控制开展研究，论文的主要内容如下：

首先，介绍了子母式机器人系统的研究背景和研究意义，对多机器人系统的研究现状进行了综述，阐述了典型的子母式机器人系统，分析了子母式机器人系统的研究现状，并对论文内容和结构做了介绍。

其次，设计并实现了一种一母多子式机器人系统，为母机器人设计了升降式回收舱和混合式移动底盘；研制了两款功能不同的子机器人，包括轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人，前者配备轮式移动底盘和连杆式机械臂，后者采用紧凑的履带底盘，并配备了具有旋转自由度的 CMOS 摄像头。此外，还给出了一种子母式机器人通讯框架。

第三，面向指定作业位置的物品更换任务，开展了子机器人之间的协调研究。设计了一种基于激光传感器和编码器融合的自定位算法，提出了一种基于弱旋转约束的相对位姿的视觉测量算法，并采用基于离轴点的 leader-follower 方式实现了履带型视觉子机器人对轮式移动机械臂的跟随。在此基础上，通过 leader 和 follower 之间的协调配合完成了物品操作任务。

第四，针对子机器人的回收问题，提出一种基于母机器人观测指引的子机器人回收方法。基于母机器人的观测，提取子机器人位姿相关图像信息，根据图像信息中非精确量化的位姿含义给出了入舱引导策略。在此基础上，设计了含模糊控制的二级控制器用于修正子机器人入舱航向，使子机器人在贴近回收舱时不仅位于入口正前方且航向基本垂直于入口从而能顺利入舱。

第五，提出了一种基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法。考虑子机器人嵌入式系统有限的运算能力，针对特征不变区间设计图像处理算法并建立了一种成像斜率-入舱角模型。以此为基础，提出子母协调式入舱策略，通过子机器人与母机器人的协调，同时调整回收舱入口的法向和子机器人的入舱航向，提高了子机器人的回收效率。此外，对子机器人最终的入舱位姿误差进行了估算。

最后，对本文工作进行了总结，并指出了需要进一步开展的研究工作。

关键词：子母式机器人系统，升降式回收舱，协调控制，观测指引，回收

Abstract

The marsupial robotic system achieves better adaptability to the environments and extends available work space by combining the mother robot's transportation capability and flexible motion of children robots. It has many potential applications in military, rescue, hazardous materials handling and environmental exploration. This thesis focuses on design and coordinated control of the marsupial robotic system. The contents are as follows:

Firstly, the research background and its significance of the marsupial robotic system are given. The research development of the multi-robot system is reviewed. Some typical examples of the marsupial robotic system are presented, and its research development is analyzed. The contents and structure of this thesis are also introduced.

Secondly, a marsupial robotic system with multi-child robots are designed and implemented. A lifting docking station and a hybrid mobile platform are developed for the mother robot. Besides, two kinds of children robots are designed with different functions, which include the wheeled mobile manipulator and the tracked vision-based child robot. The former is equipped with a wheeled mobile platform and a multi-link manipulator, whereas the latter adopts a tracked mobile platform and a CMOS camera that is endowed with a rotational degree of freedom. A communication structure for the marsupial robotic system is also given.

Thirdly, aiming at the object replacement task with a given location, the coordination between children robots are conducted. A self-location algorithm based on fusion of laser sensor and encoder is developed, and a vision measurement algorithm of relative pose based on weak rotational constraint is proposed. With the leader-follower mode based on the-off-axis point, the vision-based child robot achieves effective following to the wheeled mobile manipulator. On this basis, the task is completed by coordinated control of the leader and follower.

Fourthly, a docking method with observation-based guidance by the mother robot is proposed for the child robot. The visual information related to the pose of the child robot

is extracted by the observation of the mother robot. According to the pose implied in the visual information, the guiding strategy for docking is given. A docking controller with fuzzy control is designed, which is used to correct the heading of the child robot. The proposed approach guarantees that the child robot can reach the front of the station entrance while its heading is perpendicular to the entry.

Fifthly, a coordinated docking approach based on child robot's visual servoing is proposed. Considering the limited computing power of the child robot's embedded system, the image processing algorithm is designed based on feature-invariant intervals and a model to reflect the relationship of imaging slope and docking angle is built. Then, a coordinated docking approach is designed to make the child robot align its heading and the mother robot align the normal direction of the docking entrance simultaneously, which improves the docking efficiency. In addition, the final pose error of docking for the child robot is estimated.

Finally, the conclusions are given and future work is addressed.

Keywords: marsupial robotic system, lifting docking station, coordinated control, observation-based guidance, docking.

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	V
第1章 绪论.....	1
1.1 选题背景与选题意义.....	1
1.2 多机器人系统的研究现状.....	2
1.2.1 多机器人系统分类.....	3
1.2.2 多机器人系统的主要研究内容与热点.....	6
1.3 子母式机器人系统的研究现状.....	10
1.3.1 典型的子母式机器人系统.....	12
1.3.2 子母式机器人的现状分析.....	17
1.4 本文主要内容与结构安排.....	19
第2章 子母式机器人系统设计.....	21
2.1 引言.....	21
2.2 母机器人系统设计.....	21
2.2.1 升降式回收舱.....	22
2.2.2 混合式移动底盘.....	25
2.2.3 母机器人控制系统.....	27
2.3 异构子机器人设计.....	28
2.3.1 轮式移动机械臂设计.....	28
2.3.1.1 移动平台.....	29
2.3.1.2 连杆机械臂.....	30
2.3.1.3 控制系统设计.....	31
2.3.2 履带型视觉子机器人.....	35
2.4 子母式机器人系统通讯框架.....	35
2.5 子母式机器人系统样机.....	36
2.6 本章小结.....	40

第3章 子机器人协调作业研究.....	41
3.1 引言.....	41
3.2 基于激光传感器和编码器融合的自定位算法.....	41
3.2.1 基于激光数据的轮廓线段快速提取.....	41
3.2.2 基于线段特征匹配的位姿计算.....	44
3.2.3 基于激光和编码器数据的分频融合定位.....	46
3.3 LEADER-FOLLOWER 相对位姿测量及跟随方法.....	48
3.3.1 基于搜索树的图像特征提取算法.....	48
3.3.2 基于弱旋转约束简化 p4p 视觉测量.....	49
3.3.3 基于离轴点的跟随策略.....	52
3.4 物品更换操作策略.....	54
3.4.1 位姿微调.....	55
3.4.2 利用柱面坐标系简化 eye-in-hand 控制方式.....	55
3.5 实验.....	57
3.6 本章小结.....	63
第4章 基于母机器人观测指引的子机器人回收.....	65
4.1 引言.....	65
4.2 视觉信息获取.....	65
4.2.1 母机器人观测模型.....	65
4.2.2 双色标识的识别.....	66
4.2.3 图像特征与入舱位姿关联.....	67
4.3 基于母机器人观测的子机器人模糊指引回收.....	68
4.3.1 模糊控制简介.....	68
4.3.2 控制框架.....	70
4.4 实验.....	72
4.5 本章小结.....	76
第5章 基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法.....	77
5.1 引言.....	77
5.2 基于子机器人嵌入式视觉平台的图像处理.....	77
5.2.1 子机器人坐标系.....	78
5.2.2 特征不变区间.....	79
5.2.3 视觉信息提取.....	80

5.2.4 成像斜率-入舱角模型.....	82
5.3 子母协调式回收方法.....	83
5.3.1 协调式入舱策略.....	83
5.3.2 入舱任务建模.....	84
5.3.3 针对固定回收舱的子机器人位姿调整.....	85
5.4 子机器人入舱精度.....	86
5.4.1 成功入舱位姿精度要求.....	86
5.4.2 误差估算.....	87
5.5 实验.....	89
5.5.1 实验平台与入舱位姿精度估算.....	89
5.5.2 实验结果.....	90
5.6 本章小结.....	96
第 6 章 总结和展望.....	97
参考文献.....	99
致谢.....	I
个人简历与研究成果.....	III

第1章 绪论

1.1 选题背景与选题意义

可编程的自动化设备代替人类进入恶劣甚至有害的工作场所，执行单调重复、高负荷的作业任务，促成了机器人的诞生并被广泛应用于制造业；得益于计算机、通讯、电子、控制等技术的飞速进步，人工智能科学的普及和深化，以及以机器视觉为代表的环境感知技术爆炸式的发展，机器人的功能日趋完善，已走出环境结构化的制造业车间去执行非结构化环境下的智能作业。当前在地质勘探、军事侦查和家居服务诸多领域，机器人被广泛应用，面临的任务常常具有时间并行性、空间分布性、功能需求多样性等特点^{[1]-[6]}，这对机器人的功能完备程度提出较为苛刻的要求，机器人个体性能提升开始遭遇技术瓶颈和成本天花板。研究人员受生物社会乃至人类社会团队合作思路的启发，在努力完善机器人个体的同时开始了多机器人系统的研究，尝试集成多个低廉的个体使其涌现出优越的群体性能，与单个机器人相比，多机器人系统具备如下优点^{[7]-[8]}：

- 可以分布在空间不同位置，完成单机器人系统无法完成的任务，尤其是时空中并行的任务；
- 更具容错性和鲁棒性，能灵活调整组合状态，启动任务-资源再分配机制以应对局部失灵的情况，弥补因个体故障引发的系统性能下降；
- 可仿效蚁群、蜜蜂等生物群体，利用简洁的行为互动协议，涌现出较高的群体智能；
- 减小个体负荷，分摊成员风险，简化维护难度，使个体成员通过较少的设备和相对简单的个体行为，即可应对复杂的环境和任务。

多机器人系统研究目标在于及时优化资源配置，预防或消解系统内外部冲突，快速响应系统内部状态和外部环境任务的变化。相关研究内容涉及分布式人工智能、任务-资源优化配置、冲突消解、学习/进化算法、多智能体一致性等。

随着多器人系统的研发和应用的深入，人们发现在面对诸如救灾救援、危险品处理、环境探测、军事打击等时空跨度大的任务时，不得不面临复杂多变的空间环境和工种需求^[9]。此时，单一类型的机器人群体难以满足任务需求，在许多场景下，既希望机器人在作业场合具有较高的机动性，又希望其具有强大续航能力，能克服

较大时空跨度抵达作业地点；既希望机器人形态小�能进入狭长空间，又希望具有较大容量能携带充足的能源和大型的传感/通讯设备。类似高机动-长续航、小尺寸-大容量等互斥性的性能需求促使多机器人系统向异构化的方向发展。在袋鼠等有袋类动物的启发下，研究者们将机动灵活的小型机器人和运输型机器人同时纳入一个多机器人系统，让后者对前者进行长时空运送，前者则根据自身工种特点，专注于适应狭小空间或执行高机动作业^{[10][11]}。研究者们将这一类多机器人系统定义为子母式机器人系统。其中，母机器人的作用也不局限于仓储运输，还可以对子机器人进行能源补给、信号中继、认知辅助、决策指导甚至程序代理等^[12]，子机器人亦可作为拆合式传感器或执行器以提升母机器人的环境适应性。

子母式机器人系统本身是对多机器人系统研究的深入和发展，它使个体机器人的性能需求更加明确，功能互补性进一步加强，而系统资源配置也更容易实现优化配置。相比一般的多机器人系统，子母式机器人系统更能适应恶劣多变的环境，进行丰富多样的工种任务^[13]。通过子母式机器人组合形式，可以使机器人的研发更具针对性和灵活性，尤其是子机器人的设计容易实现硬件模块化和功能多样化，增强机器人市场资源的流通性。综上所述，子母式机器人系统的研究将有利于提升机器人系统的能力。

本文以子母式机器人系统为研究对象，研制一母多子式机器人系统以及异构子机器人的协作与自动回收等问题。考虑到子母式机器人系统本身归属多机器人系统，本绪论将首先从多机器人系统出发，介绍其研究现状，包括多机器人系统的分类、主要研究内容与热点，随后再引申至子母式机器人系统，介绍了典型的子母式机器人系统，进行了现状分析。结尾部分将给出本学位论文的主要研究内容和结构安排。

1.2 多机器人系统的研究现状

机器人系统集环境感知、运动决策、行为控制与一体^[14]。早期研究中，研究重点在于个体机器人的环境信息采集、结构设计、运动学分析、执行器控制系统及其算法等。随着其功能和效率的改进，以及可靠性和稳定性的提升，机器人被大规模应用于制造业领域。20世纪60年代，世界上第一台移动机器人诞生于美国斯坦福研究院(SRI)，拉开了自主移动机器人的研究序幕^[15]，发展至今，自主移动机器人早已走出制造业车间和实验室环境，由陆地扩展至海、天甚至外太空，具备了多种多样的形态：地面的轮式、履带、双/多足等通用型机器人，蛇型/球形/弹跳式特种机器人，水中的无人舰艇、智能潜航器、仿生机器鱼，空中四旋翼/固定翼无人机等^[16]，以及外太空的“玉兔”、“好奇号”。

伴随机器人广泛应用，人们对机器人的要求越来越高，当面对一些复杂、需要高效率、并行完成的单个机器人难以胜任的任务，多机器人协调需求日益凸显，与此同时分布式人工智能和复杂系统的研究工作逐步活跃，许多学者开始以机器人群体协作为背景深入研究，最终促成多机器人系统的产生和发展^[17]。

1.2.1 多机器人系统分类

进入90年代后，现代制造业直面用户对工业产品的个性化需求，开始了柔性化生产变革，迫切需求工业机器人具备智能的群体协作能力；而以信息化为主题的军事变革，促使各种无人机设备穿梭于群山荒漠之间，军事机器人协同作战成为趋势；另外，机器人竞技娱乐产业得到开发，以足球机器人为代表的机器人群体竞技项目受到大众喜爱；国内外研究机构结合工程实践，加快步伐，深化了对多机器人系统的研究工作，一批多机器人系统实体开始涌现，代表性的系统包括 Swarm-bots^[18]、CEBOT^[19]、M-TRAN^[20]、SuperBot^[21]、CENTIBOTS^[22]、GOFER^[24]、The Nerd Herd^[25]和 ALLIANCE^[26]等，根据多机器人系统研究侧重点的不同，可划分为以下几类：

◆ 大规模机器人系统

该系统所包含的机器人数量较多，用于研究多机器人大规模的协调作业。美国DARPA资助的百台Centibot系统项目^[22]，整合近百台小型机器人，以室内侦查及城区监控等任务为背景，研究机器人群体对未知环境进行感知和地图构建，以及相关信息的整合拼接。大规模多机器人系统的另一代表—SDR异构机器人系统由不同种类的移动机器人构成，通过相互协作构建环境地图，检测并跟踪入侵者。



图1-1 Centibot机器人系统^[22]



图1-2 SDR异构机器人系统^[23]

◆ 自重构机器人系统

上世纪80年代，日本Nagoya大学学者Fukuda受生物细胞结构启发，设计了细胞元机器人系统CEBOT(Cellular robotic System)^[19]，提出可由多个简单的细胞元机器人组合成复杂的机器人系统，根据环境或任务的变化改变成员组合方式。自从自重

构机器人系统的概念产生以来，一直是机器人领域的研究热点，研究者对系统个体进行模块化设计，通过对不同模块进行组合形成不同的功能和形态，进而使之具备较强的环境适应能力。国外典型的研究平台有M-TRAN、Millibot Train^[27]、SuperBot、Miche^[28]、SYMBRION^[29]等；我国在这一领域也取得了很大进展，代表性的包括中科院沈阳自动化所的AMOEBA^[30]和北京航空航天大学的Sambot^[31]。

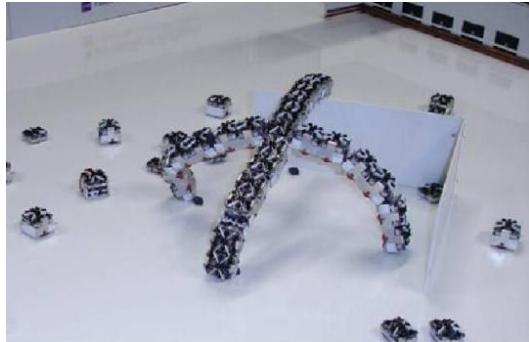


图1-3 SYMBRION组合跨越障碍^[29]

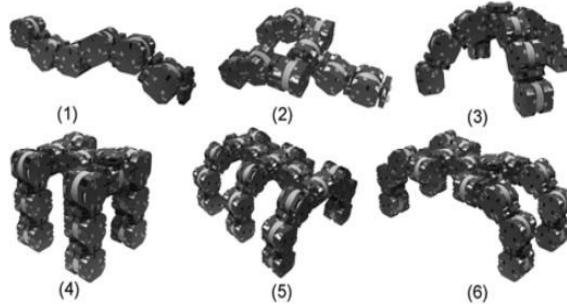


图1-4 北航Sambot的多种组合形态^[31]

◆ 群智能涌现机器人系统

上世纪中叶，普利高津提出耗散系统理论，分析了系统在什么情况下可以自发进入有序状态。进入90年代后，智能科学吸收耗散系统理论提出了集群智能思想^[32]，认为群体智能是系统中的单体在自发且简单的相互行为作用下形成的。研究者对自然界如蚂蚁、蜜蜂等昆虫社会进行模拟，以分布式系统方式组织多个自治机器人群构建出群智能机器人系统，研究交互协议以及学习/进化的算法，最终使多个简单且能力有限的个体机器人，通过相互间及与环境间的简易交互呈现出群体智能行为，代表性的系统有加拿大Alberta大学的Collective Robotics^[33]实验系统、美国USC大学开发的The Nerd Herd系统、欧盟FET支持开发的Swarm-bots^[34]系统，德国KIT大学研制的I-Swarm系统^[35]和瑞士洛桑理工学院研发的SMAVNET^[36]飞行器系统等。



图 1-5 Swarm-bots 系统^[34]

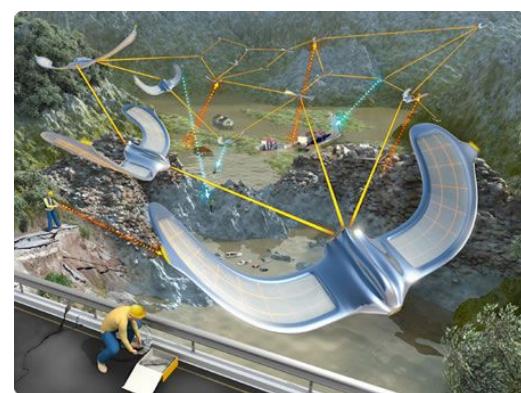


图 1-6 SMAVNET 飞行器系统^[36]

◆ 网络机器人系统

20世纪90年代初，随着信息科学的发展和普及，研究者将感知数据及控制协议汇集到同一网络，利用网络技术来优化机器人的协调作业方式，改善人机交互体验，最终形成了网络化多机器人系统。系统成员常借助于所搭载的射频电路、蓝牙模块、无线网卡等通讯设备，基于信息中继站、wifi节点形成信息网络。伴随着物联网、云计算等概念的兴起、无线通讯技术开始往5G标准迈进，实现大规模智能传感器和机器人终端的大数据互联已成为机器人学发展的重要突破口。网络化机器人系统在智能家居、信息化战争和现代农业等方面已经崭露头角。美国SSC San Diego中心COUGAR II项目^[37]将指挥车、攻击机器人和追捕机器人构建成一个作战网络，综合不同机器人侦查优势和火力优势，使多机器人系统在战场能发挥更大战斗力。瑞典Örebro University大学设计的PEIS系统^[38]将普适机器人和智能家居办公环境结合，将机器人使用者和监控传感器，家用设备紧密结合成一个生态系统，提高了环境的智能性和宜居性。

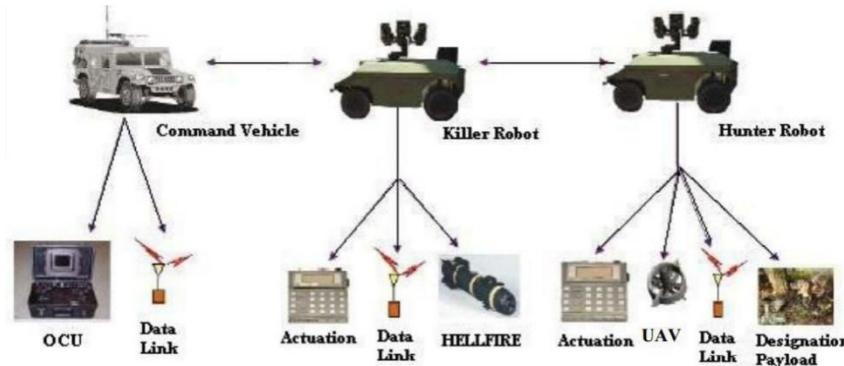


图1-7 COUGAR II网络化军事机器人系统^[37]

◆ 子母式机器人系统

20世纪90年中期，随着机器人在环境探测、灾害援救领域的应用研究的逐步升温，学者们发现同一尺寸的机器人往往难以满足任务需求：尺寸较大的机器人无法进入狭长空间进去探测危险物品或搜救幸存人员，而小尺寸机器人因携带资源有限且续航能力太弱难以完整执行任务^{[12][39]}。Murphy联想袋鼠携带幼鼠的行为，提出了子母式组合方式^[9]，将航运型机器人和小尺寸机器人集成为子母式机器人系统，进而整合母机器人的航运、补给能力、对时空的耐受能力，子机器人的机动性、对特定环境或工种的适应能力。子母式机器人系统自产生开始即吸引了国内外学者的浓厚兴趣，近年来取得较多的成果，其研究和发展现状详见1.3节。

1.2.2 多机器人系统的主要研究内容与热点

多机器人系统所涉及研究内容十分广泛，大致可为基础能力、系统机制和群智能涌现/进化三个层次：

◆ 基础能力

研究内容包括感知、通讯、运动/路径规划。感知指多机器人系统成员探测外部环境、监控自身状态以及感应邻近成员，主要研究包括传感器系统的开发和配置，相关数据的采集和处理。用于环境探测的传感器包括热红外成像仪、摄像机、激光测距仪、生命探测仪、压力传感器等；用于自身状态监控的典型传感器有GPS模块、惯性导航模块、陀螺仪、力矩传感器、电源管理模块等；邻近感应的常用电子器件包括光电对射管、霍尔感应元件等。此外还包括对成员所采集信息的提炼和融合，例如对多个地面UGV探测出的激光轮廓地图进行拼接的横向式融合，用UAV航拍图像去填充地面UGV所提炼的地表轮廓地图的纵向式融合。

通讯主要研究数据无线传输技术和组网方式，当前主流方式常借助于所搭载的GSM射频电路、蓝牙模块、无线网卡等通讯设备，进行信息网络的融合。随着4G/5G高速移动网络和云存储技术的产生和发展，多机器人通讯技术将逐渐和物联网科技融合在一起。

多机器人系统的运动/路径规划远比单个机器人困难，个体机器人除了要避免与环境障碍的碰撞外，也需要考虑多机器人系统成员间的碰撞和干扰。常用的多机器人系统规划方法包括：

- 人工势场法^{[40]-[43]}: Khatib于1986年提出一种虚拟力法，基本思想是将机器人在周围环境中的运动，抽象成刚体在引力场中的运动，目标位置对移动机器人产生“引力”，环境障碍物产生“斥力”，最后以合力方向指引机器人的运动。人工势场法结构简单，便于低层的实时控制，但容易落入局部陷阱。
- 滚动窗口法^{[44]-[45]}: 是一种基于预测控制理论的优化方法，依靠机器人实时探测到的局部信息，以滚动方式进行在线规划。每滚动一步，根据当前测得的局部信息启发生成子目标，随着窗口推进不断获取新的环境信息，集成局部反馈及其子级优化策略，最终完成整体规划目标。
- 基于行为的方法^{[46]-[49]}: 它将规划任务分解为多个相互独立、功能比较简单的行为单元，每个行为单元都具有自己的感知器和执行器，以模块化、分散化的运算方式提高机器人个体对环境障碍的响应速度，从而提高整个系统路径规划的实时性和自适应性。

➤ 此外，随机采样法^{[50]-[51]}、神经网络^{[52]-[54]}、模糊控制^{[55]-[57]}和遗传算法^[58]等智能控制的方法也被广泛应用于多机器人系统的运动规划。

◆ 系统机制

研究涉及多机器人系统的控制架构、任务-资源分配^[59]，冲突消解等。

控制架构可分为集中式和分布式^[6]，前者由中心处理单元负责所有机器人成员信息的掌控和处理，可控性强，适合于群体规模适中、作业任务及环境相对明确的多机器人系统，后者不存在中心处理单元，由各个个体独立决策，以特定协议互动，其容错性、适应性强和扩展性好，更易于群体智能的涌现，现已成为研究的主流。此外还有一种分层式结构介于上述两种结构之间，既可以借助局部控制中心迅速整合区域资源，及时应对局部环境变化，又可以通过多个局部控制中心的协作互补，使系统呈现极强的包容性和灵活性，便于形成超大规模多机器人系统。

任务-资源分配的传统算法从运筹学角度出发，用数值描述及线性规划理论解析任务收益最大化和资源损耗最小化分配方案^[60]，但面对多类型任务需求和多样化成员个体，所需规划参数种类过于繁杂，全局评价函数难以准确描述，导致实时性和准确性无法满足需求。面对传统分配方法的缺陷，一些模仿人类社会行为的算法被提出：[61]-[63]给出市场法/合同网法，采用类似招标、投标、中标等竞争式的分配方式实现分配方案的不断自我优化，[64]提到的熟人网通过建立和查询熟人属性表(包括所了解机器人名称及它们所具有的技能)以提高任务分配的效率。此外，Chen等提出了在资源存在约束情况下，在多机器人系统成员中构建Leader-Follower联盟^[65]，把拥有重要资源的机器人选为Leader，形成了一种在最大化联盟资源利用率的同时使机器人个数最少的任务分配算法。Sayyaadi等提出了一种在连续时间域内考虑智能体部署和责任能力比率的任务分配算法^[66]。[67]中刘淑华等针对具有松散和紧密耦合型任务的大规模多机器人系统，研究了基于群体智能的任务分配方法。

多机器人系统在合作完成任务过程中不可避免存在冲突，导致资源浪费、局部机能紊乱甚至是系统整体崩溃，这使得冲突消解机制的研究极为重要，一般需要解决三个问题：如何减少冲突出现几率？如何检测系统内部的冲突和无益的死循环行为？如何解决冲突和打破死锁？常用的方法包括协商法、优先级法、交通规则法、协作规则等^[68]。

◆ 群智能涌现/进化

观察研究社会性生物群体的协作或自优化方式，在多机器人系统中加以模拟获得群体智能。例如通过对鸟群飞行行为的观察研究，发现其成员个体仅利用少数邻近伙伴而非全局信息，遵守局部位姿协议就完成复杂的编队行为，从而促进了多智

能体一致性理论的研究^[69]。例如模仿蚂蚁协作行为，发现了基于信息素浓度的最优路径规划方法。^[70]学习狼群狩猎行为，让机器人模拟其Wander、Stalk、Attack和Eat动作，得到了生物启发式智能围捕策略。

此外，将生物群的学习行为引入多机器人系统也可以提高多机器人系统的整体性能。按学习内容来分，机器人的学习行为可以分为个体技能学习、协调策略学习、编组行为学习等^[5]，而从学习方法的角度看，可分为：

- 贝叶斯网络学习^[71]：贝叶斯网络是用来表示变量之间连接概率的图形模型，将主观和客观有机地结合起来，使必要但不完整或不确定的知识信息能够参与推理。贝叶斯网络由结构和参数两部分组成，因此，构建贝叶斯网络的学习包括结构学习和参数学习。
- 神经网络学习^[72]：人造神经网络是一种模仿动物神经网络行为特征，进行分布式并行信息处理的数学模型。其学习过程主要指将训练样本的数据加到网络输入端，根据反馈结果不停地调整各神经元的权值，最终优化模型参数，使输出端达到预定目标，具体学习算法又可分为监督学习和无监督学习两类。
- 进化学习：遗传算法^[73]作为进化学习的代表，将系统内部控制参数拟化为遗传基因组，提高优势参数的遗传概率，经过多次迭代竞争，收敛得到最优的参数“基因组”，其在多智能体协调方面有广泛的应用^[74]。
- 增强学习：以最大化奖励信号为目的，优化智能体实现从状态集到行为集映射关系的学习方法^[75]，优化系统性能的效率较快，在多机器人系统协调作业和编队控制等方面有着广泛的应用^{[75]-[78]}。

为了更好的推进多机器人系统理论与方法的发展，机器人学者以多机器人围捕、编队控制和多机器人SLAM等研究热点为对象进行了深入的探索和研究。

◆ 多机器人围捕

数学家Isscas等人在20世纪50年代，以导弹拦截和飞机追击为背景开展相关研究，并提出了微分对策理论^[79]；进入70年代后，围捕问题被引入多机器人系统，用于研究机器人协调/博弈行为^[80]，同时也集成控制论、机器视觉、信息融合、目标跟踪与捕获等多种研究于一体^{[81][82]}。按照环境是否建模，多机器人围捕问题被划分为两类：基于环境模型的围捕和环境无关的围捕。前者以图Graph、栅格Grid和多边形区间描述环境信息^{[83]-[85]}，然而结构化建模的方式难以应对动态环境的发展，限制了相应围捕算法的应用领域。环境无关的围捕^{[86][87]}强调根据追捕者传感器系统捕获的实时信息对目标物进行搜索、追踪和围捕，应用范围更广。许多方法被提出，Tan

将增强学习^[88]模型用于围捕问题的研究, [89]和[90]则分别以神经网络和模糊控制方法改良增强学习模型用于多智能体围捕。此外基于生物行为启发算法^[103]、入侵者动态联盟协调策略^[104]、基于松散偏好规则的群体系统自组织协调方法^[105]均被引入围捕问题的研究。此外, 还产生了一批实际的多机器人围捕实验系统, 较为有名的有南加州大学Berkeley分校的传感网络辅助围捕系统^[91], Berkeley分校的AeRobot混合围捕系统^{[92][93]}。图1-8展示的是中国科学院自动化所研发的空地协同式多机器人围捕实验系统^[94]。



图1-8 空地协同的多异构机器人围捕实验^[94]

◆ 编队控制

编队控制是指考虑环境约束（障碍物限制等），建立并保持机器人群体航行形态的控制技术^{[95][96]}，编队最早的研究动力来源于动物群体行为，良好的队形有利于探索食物，围捕猎物和抵御天敌，将编队引入多机器人系统可优化系统的环境探测、物品操作等能力，也有利于系统及时整合团队资源从而更快的应对环境的变化。编队方法通常可分为以下几种：

- 领航者领航(Leader-follower模式)^{[97]-[99]}: 以领航-跟随的形式组织系统，跟随者设法保持同相应领航者的间隔距离与相对方位，从而实现整个多机器人系统的队形控制。领航机器人可以只有一个，实行一对多领航模式，也可含多个领航者进行分层领航，但引领整个系统航向的领航者通常只有一个。
- 基于行为(Behavior-based)的方法^{[100][101]}: 事先为系统成员定义一系列基本行为，每种行为对应特定的目的，例如目标趋近、避障、队形保持等。机器人基于获取的环境信息、邻近成员状态分别输出反应向量，按其强烈程度进行加权融合输出最终的控制量。反应向量的融合方式还有基于优先级的行为抑制法、模糊逻辑等。
- 虚结构(Virtual structure)^{[102][103]}: 将整个系统看作一个刚体，每个系统成员

看作刚体上的一点，按照刚体的运动方式去保持机器人之间的相对位置。

一般分三个步骤：首先按期望的动力学特性进行刚体建模，继而计算机器人的期望运动，最后在此基础上设计轨迹跟踪控制方法。

- 还有基于图论、人工势场以及二者混合^{[105]-[106]}的队形控制方法，此外，研究人员通过一致性理论^[107]研究多智能体编队行为，从智能涌现的思想出发，注重设计简明的系统相邻成员局部互动协议，由此产生的编队控制算法高效实用。
- ✧ 多机器人自定位与地图构建CSLAM^[108]

多机器人 CSLAM(Cooperative Simultaneous Localization and Mapping)问题是指多个机器人从同一未知环境的不同地点出发，利用各自传感器收集环境信息，同时系统成员交互对信息数据进行分析、整理，最终融合为全局地图的过程^[109]。相比于单机器人SLAM，各系统成员必须基于通信网络进行信息传递与共享。当前的CSLAM研究根据通讯条件的影响可以分三类：

- 第一类研究以通信网络完全连通为前提，一般采用集中式控制方式即设置唯一的中心进行数据融合^{[110]-[111]}，实时综合所有系统成员的观测或预测数据，进行全局地图的创建和更新。^[112]讨论了该通讯条件下的SLAM收敛性问题。
- 第二类研究考虑成员个体通讯能力的范围和宽带限制，系统成员处于不同位置得到局部地图只有在相互邻近处、有利通讯条件下才能进行局部子图的拼接，拼接过程时常被间断，需重复多次才能形成完整的全局地图。研究重点在于地图配准、数据关联和地图融合，其中地图配准包括直接配准^{[113]-[115]}和间接配准^{[116]-[118]}两类方式，而数据关联除对应的直接关联和间接关联^[119]两种方式外，还包括循环闭合关联用于优化系统的定位精度^[120]。
- 第三类研究考虑稀疏-动态通信状况，不同的成员个体在进行SLAM的过程中会不断的相遇和分离，通信拓扑始终处于动态变化中，如何排除冗余拼接，防止局部误差在匹配中累积致使最终结果失真是其研究重点。Aragues等^{[121]-[122]}引入控制理论一致性算法的分布式估计方法以应对这类问题。

1.3 子母式机器人系统的研究现状

学者们在研究中发现，由同一尺寸机器人组成的多机器人系统有时难以胜任一些复杂的任务：大机器人不适应狭小环境中的任务而必须依靠小尺寸机器人代为作业，而小尺寸移动机构弱小且电力有限，不适合长距离的转移^[12]。Murphy 联想

袋鼠的特色提出了“有袋类机器人团体”(marsupial robot society)的概念^[123]，率先将“marsupial”一词引入多机器人系统，系统中有两种机器人，分别称为母机器人(mother robot)和子机器人(daughter robot)。针对中英文不同的语言习惯，国内学者在进行该领域的研究时，分别以子母式机器人系统和 marsupial robotic system 作为该类机器人系统的中英文名称。国内外研究机构已经从空-地、空-海、地-地等多个角度，针对军事打击、近海勘探、灾害救灾等多种任务背景，展开了子母式机器人系统的研究工作^{[10][12]}，甚至涉及外行星探测、空间装配和维护^{[124][125]}等极端环境。虽然 Hamido 曾定义“子母关联”的含义，认为这种联系主要发生在机器人的转移过程中，但随着子母机器人系统的不断丰富，其在组合形式上不仅仅是简单的一大一小组合，而子母间的协作行为也不只局限于母机器人对子机器人的运输和转移。

从子机器人角度出发，可将其区分为缩减型子机器人、部件型子机器人和异栖型子机器人，如图 1-9 所示。缩减型子机器人常见于早期的子母式机器人系统中，子机器人的功能/结构通常同母机器人保持一致，只是在尺寸大小和作业规模上作缩减处理，图 1-9(a)即为采用缩减型子机的子母式机器人系统^{[124]-[125]}，被应用于外太空飞行器的维护。部件型子机器人，既可以作为独立的小型机器人执行任务，亦可以作为母机器人结构的一部分发挥功能，例如图 1-9(b)所示的外行星探测机器人^[126]，子机器人可以构成母机器人的轮子帮助移动。异栖型子机器人具有和母机器人不同的移动方式，可在特定空间环境中活动，一些多机器人系统将 UAV 作为子机器人，母机器人采用无人驾驶车辆或无人舰艇发挥移动发射站的作用；还有逆向的 UAV-UGV 探测平台^[127]，以 UAV 为母机投放小型地面勘探平台(见图 1-9(c))；此外还有一些系统针对复杂地形，为子机器人设计了独特的移动方式，例如[13]中的弹跳式子机器人、[128]中的可变形子机器人以及[129]中的蛇形子机器人等。

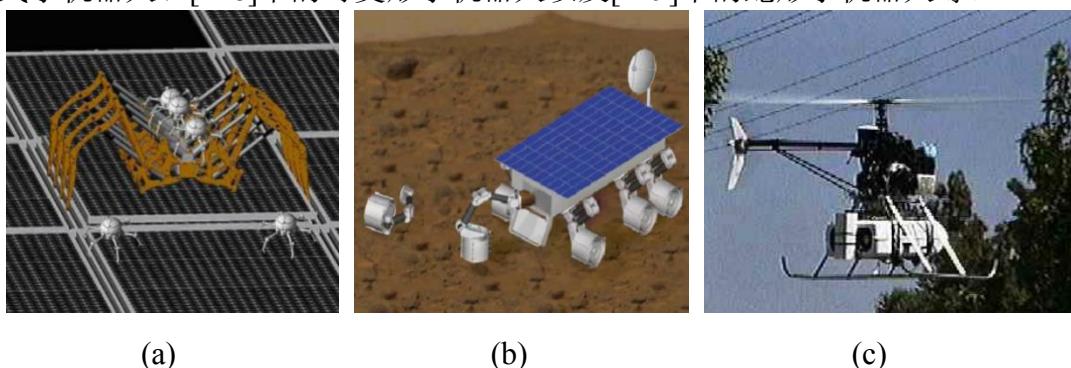


图 1-9 采用不同组合形式的子母式机器人系统。(a) 缩减型子机器人^[124]；(b) 部件型子机器人^[126]；(c) 异栖型子机器人^[127]；

从母机器人的角度出发，其通常具备相对完备的能源装置、传感器系统、通讯

设备及更高性能的处理器平台，母机器人除了仓储和运输子机器人外，还可进行能源补给、辅助环境认知、信号中继、团队组织及决策甚至代理子机器人的运算。总体来看，母机器人所扮演的角色大致可归纳为以下几类^[12]：

- ◆ 运载者：运送子机器人至指定作业区域，完成作业后，及时转移到下一工作地点。
- ◆ 教练：母机器人可承载丰富的传感器，搜集相对完整的感知数据帮助子机器人理解周边环境，进而指导子机器人的姿态调整、路径规划等。
- ◆ 管理者：母机器人可搜集系统内各成员的状态数据，综合环境信息和总体任务需求，实现各成员之间协调协作的优化。
- ◆ 信使：母机器人的通讯能力常优于子机器人，可以帮助子机器人进行信息交换，也可以作为中继站实现子机器人与外界的交互^[129]。
- ◆ 处理器：在许多子母式机器人系统中，子机器人的计算能力过于薄弱，常需要母机器人帮其处理数据，甚至完全代理计算^[128]。
- ◆ 后勤：后勤是指母机器人为子机器人长时间的顺利工作创造条件，例如为其清除部分环境障碍，帮助运输原材料或设备^[124]、补充能源^[130]等。

1.3.1 典型的子母式机器人系统

国外子母式机器人的研究得到了能源、军事装备和航天部门等的大力支持，在室内探测、军事、航空航天等诸多领域皆取得了较好的研究成果。

1996 年，美国萨凡纳河技术中心(SRTC)和橡树岭国家实验室(ORNL)在 The Office of Technology Development 的资助下研发了室内子母式机器人系统，如图 1-10 所示，用于探测能源建筑内的辐射数据^[130]。母机器人 MACS(Mobile Automated Characterization System)体积庞大能携带多个辐射强度探测器在较宽阔的房间内进行数据采集，但对于一些死角或狭窄房间无计可施，此时可依赖缩减版的子机器人 RACS(Reduced Access Characterization Subsystem)补充作业。由于数据容量以及通讯距离等限制，RACS 须借助母机器人的运输抵达作业地点，且借助其存储空间和通讯能力、收容超量数据、接收控制台的指令。此外 RACS 还配有一个集成光电引导功能的手持设备 TRACS，在子机器人 RACS 离开 MACS 进入作业空间时，将 TRACS 置于入口处保证子母机器人间的通讯连接，作业结束后借助光电引导返回至分离点。

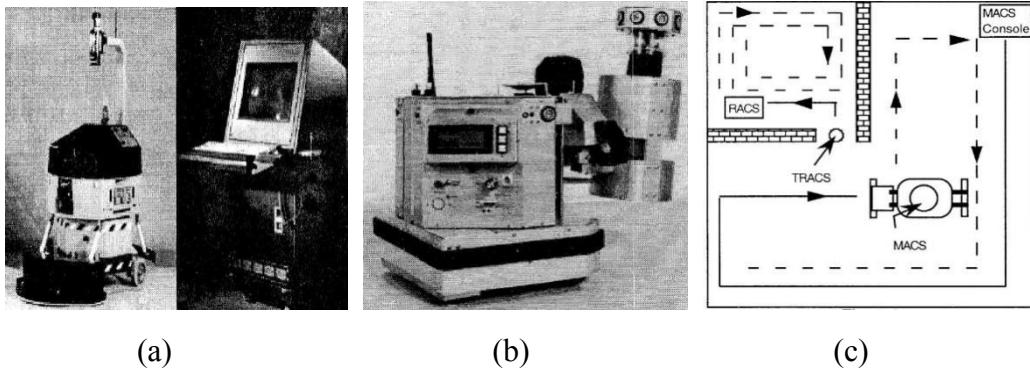


图 1-10 美国 ORNL 实验室的室内探测机器人系统 MACS-RACS^[131]。(a) 母机器人 MACS 及监控台; (b) 子机器人 RACS 及手持设备 TRACS; (c) 子母协调探测

2002 年, 美国圣地亚哥空间和海战系统中心(SSC San Diego)将子母式机器人概念引入军事领域^[132], 为战地机器人 MDARSE 研发投放系统, 包括小型的无人驾驶车辆(UGV)和垂直发射式无人机(UAV), 如图 1-11 所示, 其中战地机器人 MDARSE 具有较强越野能力, 能进行大范围战地执勤, 所运载的小型 UGV 采用履带移动结构, 具有防水能力, 能执行狭窄隧道甚至下水道的侦查任务, 而垂直发射式 UAV 具有高机动性, 能响应突发需求升入空中, 以更大的视野及时侦察战场事态。母机器人 MDARSE 有效弥补了两种子机器人续航能力的不足, 为它们提供必要的地面火力支援, 而 UGV 和 UAV 两款子机器人能协助母机器人勘察隐蔽隐患, 响应突发事件, 通过子母结合的方式提高了多机器人系统在战场中实战的价值。



图 1-11 SSC San Diego 军事子母式机器人系统^[132]。(a) MDARSE-UGV(地-地); (b) MDARSE-UAV(地-空)

受美国海军研究局ONR的资助, Lindemuth等人将无人直升机和无人水上机器人构成一套子母式系统Sea-RAI^[10]用来做近海侦查, 如图1-12所示。以水上机器人USV 作为移动母机器人用于检测水面和水下环境; 无人机UAV作为子机器人在空中采集图像, 提供广阔的视角。水面机器人的承载可较好地克服无人直升机续航时间短的弱点。这种子母式的联合方式, 可以用较低的成本实现较大区域的近海侦测, 为海防、港口安全、近海基础设施维护、突发事件应急提供了有力的支撑。



图 1-12 海-空式近海侦查子母式机器人系统 Sea-RAI^[10]

图1-13为德国人工智能研究中心(DFKI)在德国航空航天中心(DLR)的资助下研发的可重构多机器人探索系统^[133]，其由Sherpa和Crex两个太空探测机器人组成，其中Sherpa具有较大尺寸采用轮足式移动机构在外星球表面执行大范围探索任务，Crex为小型六足移动机器人，可进入小型的坑道在复杂地形中进行环境探索。研究者分别为Sherpa和Crex设计了机械臂和抓持卡具，使Sherpa能帮助Crex进行长距离转移，通过子母式的组合提高对多样化环境的适应性及探测能力。



图 1-13 DFKI 可重构多机器人探索系统 Sherpa-Crex^[133]

在子母式机器人系统领域，研究最多的还是以灾难援救为背景的地-地子母式机器人系统。图1-14展示了佐治亚理工学院Dellaert等人研究的室内搜救子母式机器人系统^[134]，它由母机器人ATRV-Mini和四个Aibo子机器构成，母机器人采用轮式结构，配备一个激光传感器和由八个微摄像头环绕构成的摄像头组，可实时构建现场地图，监控相对开阔空间，遇到难以探测的低矮环境时则释放所运载的子机器人Aibo，凭借其头部嵌入的摄像头采集低矮处场景图像，通过无线通讯传送给监控者。



图 1-14 佐治亚理工学院室内搜救子母机器人系统^[134]。(a) 母机器人 ATRV-Mini 和四个 Aibo 子机器人; (b) 子机器人离开 ATRV-Mini 进行探索

南佛罗里达大学以可形变小型机器人Bujold作为子机器人和母机器人Silver Bullet构成城市救援子母式机器人系统(见图1-15)。Bujold装备摄像头、小型麦克风和扬声器装置可利用自身变形适应复杂环境探测狭窄空间，拍摄危险物品的图像；被困在坍塌物中的幸存者可以借助子机器人Bujold的语音装置沟通施救者以提高生存几率。但Bujold本身缺乏控制系统和电源，由母机器人Silver Bullet为其供电，收集其传感器信息并代理处理程序。

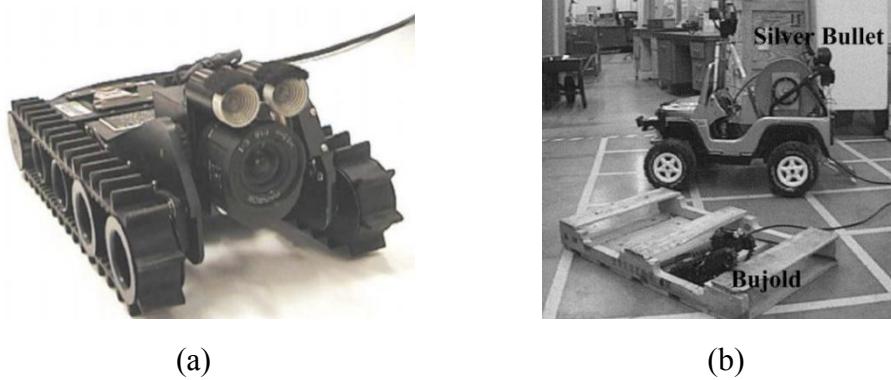


图 1-15 包含可形变子机器人的子母式机器人系统^[127]。(a) 可形变子机器人 Bujold; (b) 母机器人 Silver Bullet

美国明尼苏达大学的Hougen及其团队从上世纪90年代初，一直从事子母式机器人系统的研发工作^{[135]-[138]}，其子机器人scouts采用特殊的胶囊结构(见图1-16(a))，可利用左右驱动轮前进，还配备弹跳机构，可越过障碍进入复杂的环境中采集图像。其母机器人系统有多个版本，早期系统中母机器人以ATRV-Jr型机器人担任，配备气动发射装置(见图1-16(b))，可像发射子弹一样发射子机器人^[135]，但存在着子机器人无法被回收利用的问题；后以Pioneer 2-AT平台为母机器人，在其尾部配备回收拖箱，使得子机器人可以返回拖箱以便于再次利用^[137]。为了增加子机器人的续航能力，又设计了具有充电功能的回收舱装置，可以对子机器人进行能源补给^{[130][138]}。

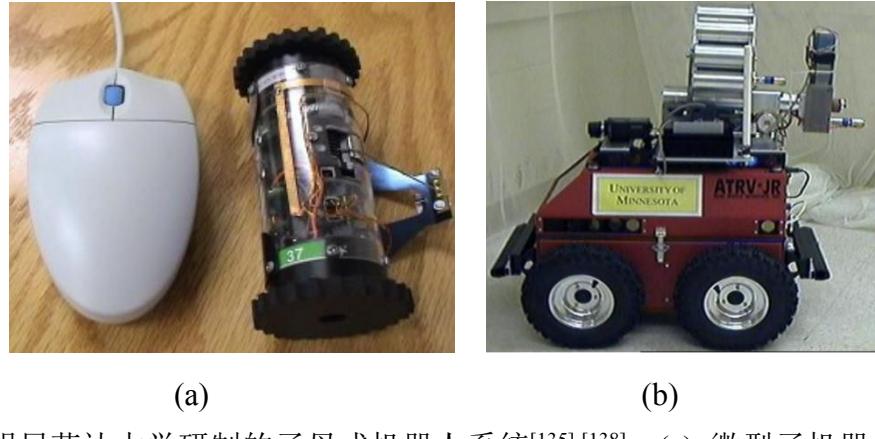


图 1-16 明尼苏达大学研制的子母式机器人系统^{[135]-[138]}。(a) 微型子机器人 scouts;
(b) 子机器人气动发射装置

国内子母式机器人的研究也取得了一定进展，哈尔滨工业大学赵杰等人设计了由蛇型子机器人和履带母机器人构成的子母式系统用于矿难救援(见图 1-17)，母机器人遇到无法进入的狭窄空间后，释放子机器人并抛洒传感节点，用于勘查灾情、搜索受困者，同时母机器人为子机器人提供传递指令^[129]等后勤辅助。中国科学院自动化所开展了子母仿生机器鱼的研究(见图 1-18)，研制出配备了拉线式运载装置的母机器鱼和具备协调跟随能力的子机器鱼^[139]。此外邴志刚等人提出了基于母机器人、子机器人和传感节点的三层传感网络结构 HEDPA^[140]。

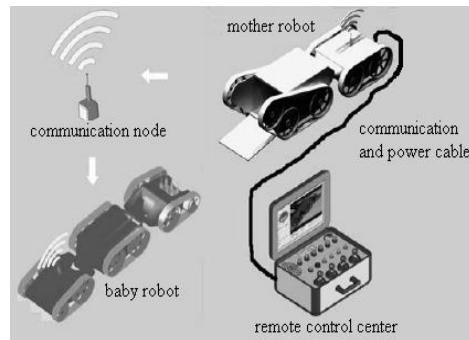


图 1-17 矿井救援机器人^[129]

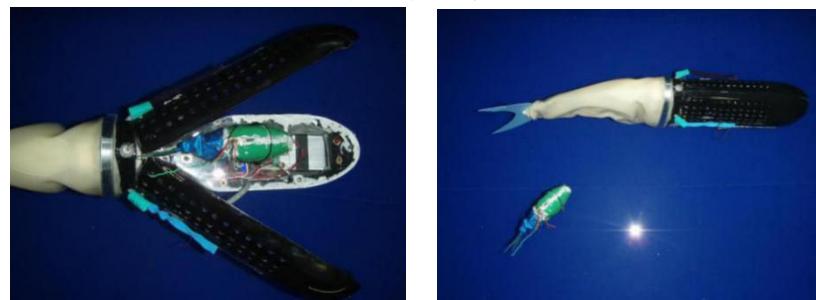


图 1-18 子母仿生机器鱼^[140]

1.3.2 子母式机器人系统的现状分析

◆ 子机器人仓储及调度装置

仓储及调度装置是子母机器人之间结合的纽带，设计时要求其能灵活地调度子机器人，并具备模块化属性，可安装在不同型号的母机器人上。在早期的子母式机器人系统中，子机器人的仓储方式比较简单，只是在母机器人本体上直接开孔洞，或简单挂载腔体以收容子机器人(见图 1-19)，对子机器人缺乏灵活的调度能力，更难以进行多个子机器人的管理。

美国明尼苏达大学经过较为深入的研究，设计了图 1-20 所示的六自由度回收舱，在舱的前端或后端装有二自由度调度装置，通过前后平移和升降实现对多个子机器人的出入舱调度，此外还配备可上下移动的卡具，防止移动过程中实现子机器人松脱^[138]。美军坦克自动化研究中心(TARDEC)基于模块化思想^[141]设计了由标准化卡具拼接而成的 UGV 仓储装置(见图 1-21)。



图 1-19 早期的子机器人仓储装置

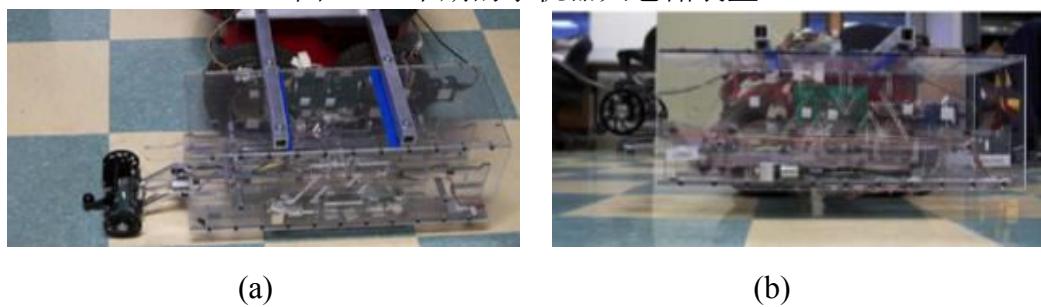


图 1-20 明尼苏达大学六自由度回收舱^[138]。(a)子机器人邻近回收舱入口；(b)子机器人被回收舱调度装置托举

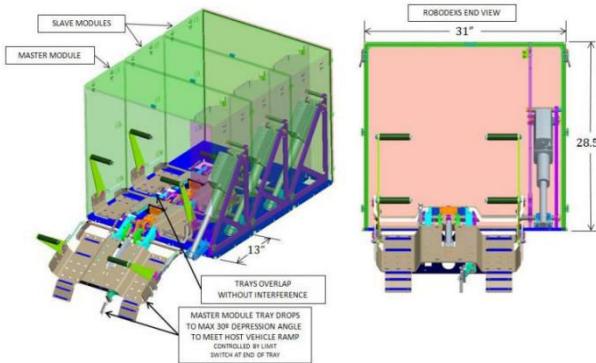


图 1-21 TARDEC 模块化 UGV 调度装置^[142]

从当前的子机器人仓储装置现状来看，通常多个子机器人置于同一高度，子机器人大都按照 FIFO (先进先出)或 FILO (先进后出)的方式进出，其调度的灵活性有待改善。

◆ 子机器人间协调作业

当前国内外子母式多机器人系统协调行为研究主要以环境快速探索为课题，将子母机器人定义为功能一致的个体进行仿真研究^[142]，其中子机器人的多样性有待挖掘，不同子机器人在狭窄环境下的协调作业行为也有待研究，包括：① 子机器人感知与运算能力有限，如何利用有限的资源实现自身定位？② 如何感知相对位姿信息？

◆ 子机器人回收方法

子机器人回收是子母机器人协调的一个关键功能，当子机器人需要转移工作地点、补充能源，或躲避有害环境时，进入相应的回收装置内部；而回收本身也是子母式机器人系统研究的一个技术难点，子机器人往往能力有限，返回时不易感知其与回收装置的相对位姿，更难以实现入舱所需位置与姿态的精确控制。

在早期 MACS&RACS 系统设计中，特意为子机器人 RACS 设计了一个光电引导装置 TRACS，要求子机器人本身能反复回收利用 TRACS 装置，增加了工程实现的复杂性^[130]。Dellaert 等人设计的室内搜救子母式机器人系统，由子机器人 Aibo 实时传回图像，操作者基于远程视频遥控子机器人返回运载平台，智能化程度较低^[134]。用于城市救援的子母式机器人 Bujold&Silver Bullet，回收时由子机器人采集回收舱引导标识，将图像传送给母机器人处理指导其运动^[143]，然而整个过程需要传输大量的图像数据，若采用有线的子母连接方式将限制子机器人活动范围，而无线传输又会占用大量的通讯带宽，易受干扰。美国明尼苏达大学设计的子母式机器人系统，基于图像视觉牵引回收子机器人，但是，子机器人仅能简单地趋近入口，靠近后以随机姿态跳入回收盒中，子机器人着舱位姿不可控；[144]在回收舱入口粘贴引导角

点，子机器人拍摄引导角点图像，将视频无线传输给第三方PC进行图像处理，实际应用中有较大的局限性；此外Wurm还推荐了基于母机视觉指引的回收方法[138]，即由母机器人直接识别子机器人的入舱姿态指引其回收，但未对方法进行详细的描述。

综合上述子母式机器人系统在其关键研究—仓储及调度装置设计、子机器人间协调作业以及子机器人回收方面的现状，可以看出子机器人调度的灵活性有待改善，异构子机器人的功能互补，以及子机器人与母机器人协调配合的快速回收有待发掘。本文面向这些不足，设计一母多子且子体功能有差异的多机器人系统，为母机器人设计升降式回收舱以灵活调度子机器人、设计小型可移动机械臂用于物品操作、履带型视觉子机器人开展环境探测；在此基础上，进行子机器人间的协调作业，解决基于嵌入式平台的定位和相对位姿测量问题，并应用于物品协调操作任务；最后研究了多种子机器人的回收策略，为子母式机器人系统的应用提供了技术支撑。

1.4 本文主要内容与结构安排

子母式机器人系统作为一种特殊的异构多机器人系统，结合母机器人运载能力和子机器人功能的多样性、灵活性，相比一般的多机器人系统更能适应恶劣多变的环境，具有重要研究意义和实用价值。本文结合国家自然科学基金项目“多子机灵活收放的子母式机器人控制与协调研究”和“静态节点社区感知网络下的多机器人协调机理与控制研究”，开展了子母式机器人系统的设计与协调控制研究。论文的结构和内容安排如下：

第一章 首先对子母式机器人系统的研究背景和研究意义进行了阐述，在介绍了多机器人系统的研究现状后，对子母式机器人的研究现状进行了综述。最后介绍了本文的主要内容和结构安排。

第二章 研制了一种一母多子式的多机器人系统。为母机器人设计了可灵活调度子机器人的升降式回收舱，配备了混合式移动底盘以及摄像头、激光传感器设备，并构建了母机器人的控制系统；开发了两款功能不同的子机器人，一种是轮式移动机械臂，采用轮式移动底盘和连杆机械臂，可灵活拾取物品，另一种是履带型视觉子机器人，采用紧凑的履带底盘，配备了可旋转的CMOS摄像头以灵活地捕捉环境图像，另外基于ARM9微处理器和STM32单片机设计感知决策单元和运动控制单元，完成了子机器人嵌入式控制系统的搭建；此外给出一种子母式多机器人系统的通讯框架。

第三章 开展了子机器人之间的协调作业研究,为轮式移动机械臂设计了基于激光传感器的轮廓线段提取方法,进而通过基于线段特征匹配和编码器融合的算法实现了轮式移动机械臂的自定位巡航;设计了基于弱旋转约束的相对位姿视觉测量算法,在此基础上实现了履带型视觉子机器人对轮式移动机械臂的实时跟随。这两个机器人在协调抵达指定作业区域后,借助物品更换操作策略完成目标物品与替换物品的更替操作,最终携带原目标物品返回。所提方法通过实验进行了验证。

第四章 为实现对子机器人的回收,设计了一种基于母机器人观测指引的回收方法。将摄像头安装于回收舱入口处,母机器人基于子机器人双色标识中的颜色交界线特征与子机器人入舱位姿间的关联,设计了含模糊控制的二级控制器。实验结果表明,所提回收方法实现了对子机器人入舱姿态的指引,使其在母机器人的观测和指引下成功回舱。

第五章 提出了一种基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法。考虑到子机器人嵌入式系统的运算能力不足,分析颜色特征不变区间进而设计图像处理算法,保证子机器人可实时提取回收舱引导标识的视觉信息,继而建立了成像斜率-入舱角模型,在此基础上设计子母协调式入舱策略,使子机器人和母机器人根据视觉信息协调调整子机器人的入舱航向和回收舱入口的法向。另外,为应对固定回收舱的情况,给出了子机器人的位姿调整策略,并估算了子机器人最终的入舱位姿误差。实验表明了所提方法的有效性。

第六章 对本文完成的研究工作进行总结概括,并指出需要进一步开展的工作。

第 2 章 子母式机器人系统设计

2.1 引言

子母式机器人作为一种异构式多机器人系统，具有独特的研究价值。子机器人可以借助母机器人的仓储和运载扩展时空跨度，免受长途跋涉带来的困扰，将资源全部用于任务执行过程；母机器人则可以利用子机器人的灵活性，深入探测复杂环境，根据不同子机器人的功能特点，完成多种任务。通过子母式机器人系统的研究，可进一步发掘多机器人系统的优点，扩大工作区间，适应不同场景，执行多样化的任务。在设计上，子机器人需具有较小的尺寸以适应狭小空间，相互具备不同的功能以更好的协调作业；而母机器人需要充分利用自身空间，配备合理的调度装置，实现对多个子机器人的仓储、运输及灵活调度，另外母机器人的移动机构还应当能够适应不同的路面环境。

本章介绍了一种子母式机器人系统的设计方案，包括母机器人设计和异构子机器人设计两部分；前者介绍了母机器人的系统框架，给出了升降式回收舱和混合式移动底盘等结构的设计思路；后者则介绍了轮式移动机械臂和履带型视觉两类子机器人，其中轮式移动机械臂的设计涉及移动平台、连杆机械臂和控制系统等多个方面，履带型视觉子机器人结构相对简单，其控制系统在前者的基础上进行缩减即可。最后，研制完成了包含这三种机器人的子母式机器人系统样机。

2.2 母机器人系统设计

母机器人的结构布局如图 2-1 所示，由升降式回收舱、混合式移动底盘和控制系统三部分组成，其中回收舱包含子舱、升降平台、步进电机及丝杆传动相关组件；移动底盘包含两侧轮履组件、驱动电机及同步带传动相关组件；控制系统除板载 PC、激光传感器、摄像头传感器和锂电池组外，还包含机构控制板、各电机驱动器和接触开关等底层电路元件。

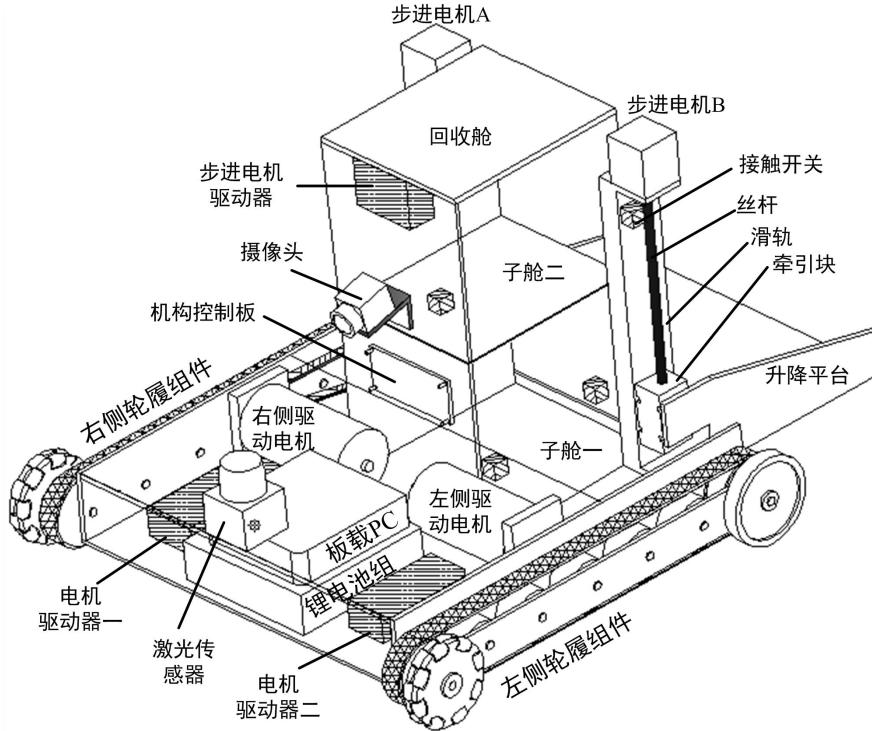


图 2-1 母机器人的结构布局

2.2.1 升降式回收舱

升降式回收舱的结构细节如图 2-2 所示，内部进行隔段处理(隔段数量和高度可根据子机器人的数量和尺寸设定)，得到垂直分布的不同子舱；升降平台贴近各子舱入口，可对内部子机器人进行灵活调度，两侧的步进电机在丝杆传动的作用下为平台升降提供动力，左侧丝杆上部装有接触开关用于初始复位和高度限位；此外，升降平台和各子舱内皆装有一个接触开关，对子机器人进行仓储感知。

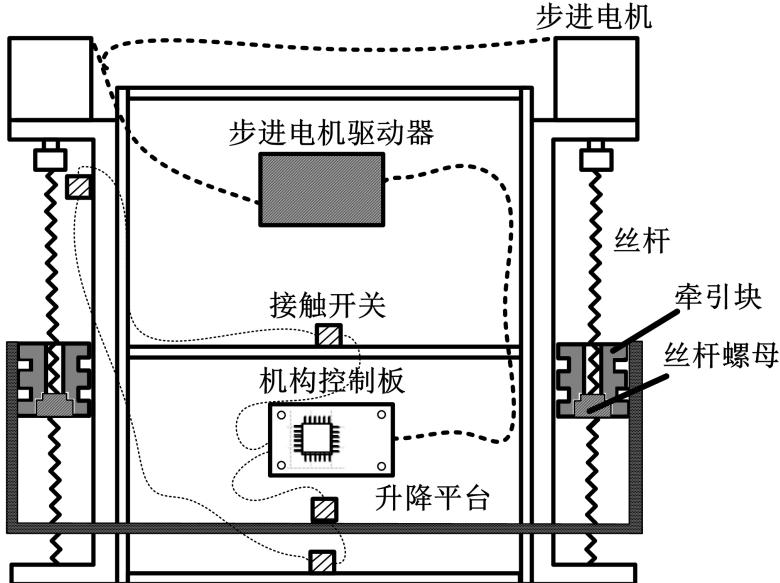


图 2-2 升降式回收舱内结构

1) 升降平台的高度感知

升降平台基于丝杆传动在两个步进电机的牵引下垂直运动，而这两个步进电机由同一个步进电机驱动器驱动，接收相同的相位节拍信号以保证运动协调一致。步进电机的转动经过丝杆和丝杆螺母的相互作用转变为牵引块的竖直运动，若步进电机的步距角为 α ，丝杆导程为 S，则每一个相位节拍信号对应升降平台的高度变化为：

$$\delta = \frac{\alpha S}{360^\circ} \quad (2-1)$$

步进电机驱动器节拍信号的输出量直接受机构控制板控制，只要给定初始高度，机构控制板可即时计算出升降平台的高度。因此，在上电时驱动器首先发出使升降板上移的相位节拍信号，直到左侧丝杆顶部的接触开关（见图 2-2）被牵引块触发，此时机构控制板将节拍信号数量清零，并设置初始高度等于升降上限高度 h_{top} ，之后升降高度采用(2-2)式计算。

$$h = h_{top} - \sum \delta p_{down} + \sum \delta p_{up} \quad (2-2)$$

其中 p_{up} 和 p_{down} 分别对应初始化之后升降平台上升或下降的节拍信号数量。

2) 步进电机选型

升降平台整体重量为 3kg（包含两侧的丝杆螺母、牵引块总量在内）。单次只对一个子机器人进行调度，假定其重量为 5kg，丝杆导程 S 为 0.4cm，传动时损耗系数 k_T 设定为 0.7，则单个步进电机的额定转矩不得低于

$$T = \frac{1}{2} \times \frac{GS}{2\pi k_T} = \frac{1}{2} \times \frac{8 \times 9.8 \times 0.4}{2 \times 3.14 \times 0.7} = 3.57 N\cdot cm \quad (2-3)$$

采用通用 42 步进电机即可满足力矩要求。结合安装尺寸，选用 BS42HB33-01 型步进电机作为升降平台的驱动电机，其额定电流为 0.95A，所配备的驱动器为珩源公司 HYQD40-H5742 步进电机驱动器，其能承受最大驱动电流为 3A，可同时驱动两个步进电机。

3) 接触开关信号采样

每一个子舱内侧均装有一个接触开关用于感知是否有子机器人完全进入其中，另外在升降平台内侧也装有接触开关用于感知子机器人是否抵达适于平台升降的位置。例如，感知子机器人是否从升降平台完全进入指定子舱，首先在升降平台的接触开关上感知到一个下降沿，而后在指定子舱接触开关上感知到一个上升沿；而子机器人由子舱进入升降平台时，首先在指定子舱接触开关上感知到一个下降沿，随后在升降平台的接触开关上连续感知到一个上升沿和一个下降沿，此时子机器人刚好完全退入升降平台，可执行升降操作。

机构控制板采用以 STM32 单片机为 MCU(微处理器)对接触开关进行信号采样，为了减少 I/O 口配置，简化电气线路布局，所有的接触开关连同一个基准电阻 R_0 被串接到同一个电气回路上，MCU 仅利用一个 ADC(模数转换)管脚在基准电阻一侧进行电压值采样，电路简图如 2-3 所示。

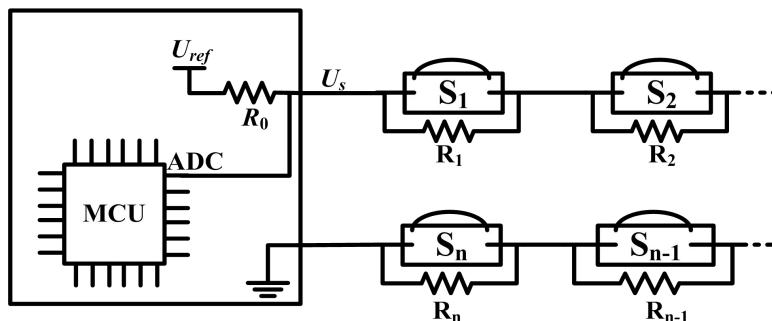


图 2-3 接触开关信号采样电路简图

每个接触开关 S_i 在串接到回路之前均同一个特定阻值的关联电阻 R_i 并联，各关联电阻 R_i 阻值关系满足式(2-4):

$$R_i > \sum_{j=i+1}^n R_j \quad (2-4)$$

若 S_i 触发，则 R_i 的阻值将从回路上被短接出去，则整个采样回路的阻值为：

$$R_s = \frac{U_s}{U_{ref} - U_s} R_0 = \sum (1 - T_i) R_i \quad (2-5)$$

其中 T_i 是一个 BOOL 型参数，若为 1 表明接触开关 S_i 被触发。接触开关的触发序列 \mathbf{T} 见算法 2.1。

算法 2.1 接触开关触发序列检测

输入：采样回路阻值 R_s ，接触开关的数量 N_s ，接触开关各关联电阻阻值 R_i
 输出：接触开关触发序列 T 。

```

1  $R_{temp} \leftarrow R_s;$ 
2 for  $i=1:N_s$ 
3   if ( $R_{temp} \geq R_i$ )
4      $T_i = 0;$ 
5      $R_{temp} \leftarrow R_{temp} - R_i;$ 
6   else
7      $T_i = 1;$ 
8   end
9    $T \leftarrow T_i;$ 
10 end
```

需要指出的是，如果在同一条采样回路中设置的接触开关过多，最小的关联电阻相对基准阻值将会过小，导致与之相应的电压值变化太弱。当MCU的ADC管脚分辨率不能满足要求时，可适当增加采样回路的条数。

2.2.2 混合式移动底盘

轮式差动移动方式广泛应用于室内移动机器人中，其具备结构简单、噪音小、易于控制等优点，但对崎岖路面的适应性差，而履带移动方式可以弥补这方面的不足。为了结合两种运动方式，本章提出了一种简便的机构整合思路，设计了图2-4所示的混合式移动底盘。移动底盘以轮履组件为基础，每套轮履组件包括主动轴、主履带轮、从履带轮、驱动轮、全向轮、从动轴、履带和若干履带支撑轮。底盘两侧驱动电机通过同步带传动经过3: 1减速比驱动主动轴1运转，主履带轮2和驱动轮4并联固定在主动轴1上随其一同转动，主履带轮2驱动履带7及与之相连接的从履带轮3和履带支撑轮8；相似地，从履带轮3和全向轮5并联固定在从动轴上，二者同时转动。驱动轮4和全向轮5的直径分别略大于主履带轮2和从履带轮3，当母机器人在平滑的室内路面行驶时，仅由驱动轮4和全向轮5着地支撑着底盘的移动，而履带组件被悬挂未同地面接触，此时移动底盘发挥出轮式机构在平滑路面的移动优势；当母机器人驶入崎岖的路面环境时，履带组件同路面的坑洼或凸起物相接触，从而为移动平台提供动力，进而发挥出履带机构在崎岖路面的运动优势。此外，受益于履带的传动，驱动轮4和全向轮5保持同步转动可同时为底盘提供动力。

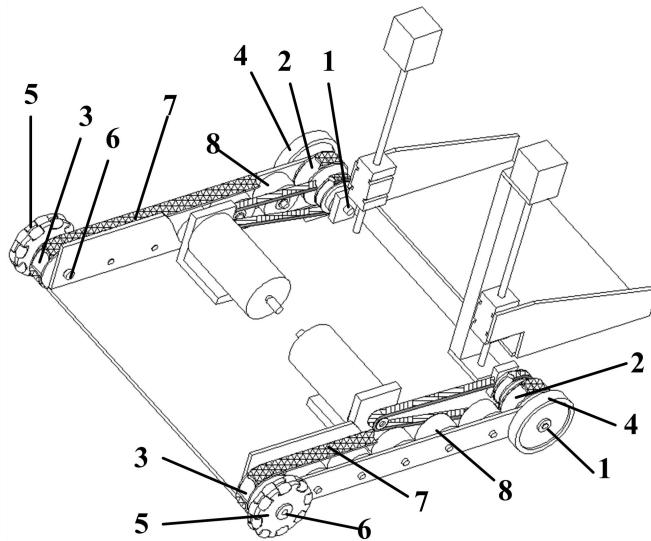


图 2-4 底盘轮组件机构简图

- 1: 主动轴; 2: 主履带轮; 3: 从履带轮; 4: 驱动轮;
5: 全向轮; 6: 从动轴; 7: 履带; 8: 履带支撑轮

母机器人底盘驱动电机的选型相对复杂，需要同时考虑功率、转矩和基础转速。

按阻尼较大履带移动方式估算阻力(即参考滑动摩擦而非滚动摩擦计算阻力)，将重力和阻力比设置为1:1，母机器人的整体重量在16KG左右，预设15KG的子机器人负载重量，假定额定状态下以0.8m/s的速度运动，母机器人需要的额定有效驱动功率为：

$$P_{\text{额}} = fv = (31 \times 9.8 \times 1.0) \times 0.8 = 243.04 \text{W} \quad (2-6)$$

则平均每一侧驱动电机提供的功率为121.52W，考虑到传动损耗，选取电机的功率在140W~160W之间。

计算单侧牵引力矩 $T = f \cdot R / 2 = 7.595 \text{Nm}$ ，其中 R 取尺寸较大的主动轮的半径(5cm)进行计算，则在经过3:1的同步带减速之前，要求驱动电机的输出力矩为2.53Nm，为电机配备6倍数减速箱，再考虑传动损耗，减速前电机的额定输出转矩满足0.5Nm即可。

而所需驱动电机的基本转速为：

$$n = 60 \times \frac{vi}{2\pi R} = 2751 \text{rpm}(\text{转/分}) \quad (2-7)$$

其中 $i=3 \times 6=18$ 为驱动电机传动到主动轮的整体减速比。

结合安装尺寸，选用时代超群公司的57BL95S51-230TF9型无刷直流电机作为移动平台的驱动电机，其额定功率、额定转矩和额定转速转速分别为150W、0.5Nm

和3000rpm可满足要求。另外，为了保证移动机器人的运动精度，选用超群公司ZM-6508型直流无刷驱动器，其可读57BL95S51-230TF9电机自带的霍尔编码器信号，构成速度控制闭环。

2.2.3 母机器人控制系统

图2-5给出了母机器人控制系统框架，其中母机器人板载PC的CPU/RAM配置为双核1.8GHZ/4GB，运行win7操作系统，嵌入一块无线网卡，可借助无线网络和TCP/IP协议连接监控台。摄像头传感器和激光传感器分别基于USB2.0和RS232接口引入PC，采集母机器人前方的图像场景和障碍物信息为母机器人的运动决策提供依据；此外，PC上预留USB、RS232接口为加装蓝牙适配器、GPS、惯导模块等设备提供条件。

机构控制板以STM32单片机为核心组件，基于RS232串口协议读取PC所发出的运动指令，并生成PWM脉冲信号控制各电机驱动器驱动相关电机发生动作，此外机构控制板对分布在回收舱上的接触开关进行信号采样以感知子机器人的仓储情况，并将结果反馈给板载PC。

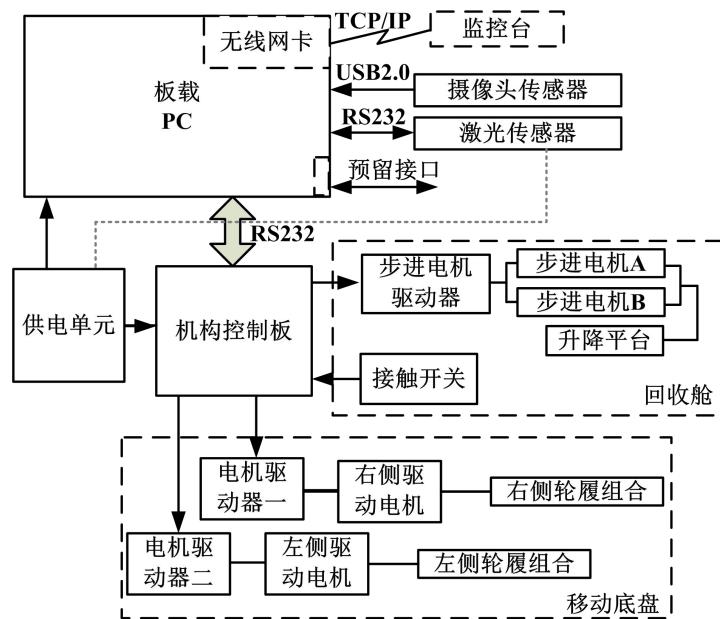


图2-5 母机器人控制系统框架

供电单元以24V锂电池组为基础，分别为PC、激光传感器以及机构控制板提供12V和5V电压，另外为各电机驱动器提供24V动力电压。

移动底盘的左侧驱动电机和右侧驱动电机由不同的电机驱动器驱使，可实现差速控制，而回收舱的左右步进电机被同一个步进电机驱动器驱动，以保证两侧丝杆

组件同步牵引升降平台，实现竖直方向的平稳运动。

2.3 异构子机器人设计

一母多子式的子母式机器人系统在国内未见开展，而国外为数不多的几个多子式系统中，子机器人均同质化设计，即子机器人的硬软件结构一致，功能比较单一。为了研究子机器人之间功能互补的优势，本章对考虑异构子机器人，研制了两款机械结构不同、功能迥异的子机器人，包括轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人：前者功能较强，配备有机械臂、CMOS 摄像头和激光传感器，能完成指定物品的操作；后者仅装有 CMOS 摄像头，用于采集环境图像，也可基于视觉伺服协助前者完成作业任务。下面将详细介绍移动机械臂子机器人的系统设计，包括其移动平台、连杆机械臂和控制系统框架；履带型视觉子机器人组件简单，只作粗略概述。

2.3.1 轮式移动机械臂设计

轮式移动机械臂的结构如图 2-6 所示，包括轮式移动平台、连杆机械臂和控制系统；其中移动平台前部装有激光传感器，右侧固定控制系统，左侧配备一个小型抽气装置（直流真空泵）；机械臂具有四个自由度，其末端装有微型 CMOS 摄像头和气动吸盘，气动吸盘通过软管与抽气装置相连，吸盘上还装有一个小型接触开关，在拾取物品时一旦接触到目标物品则激活抽气装置产生吸力，继而抓持物品执行后续操作。

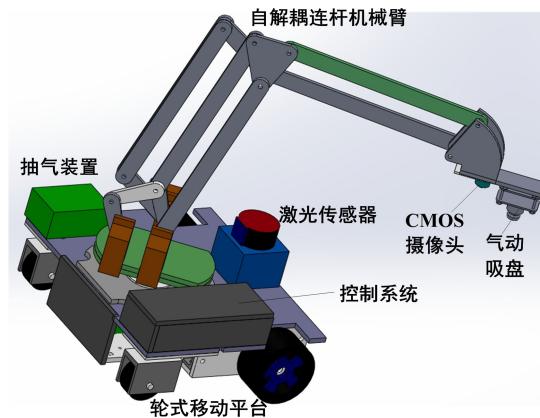


图 2-6 轮式移动机械臂

2.3.1.1 移动平台

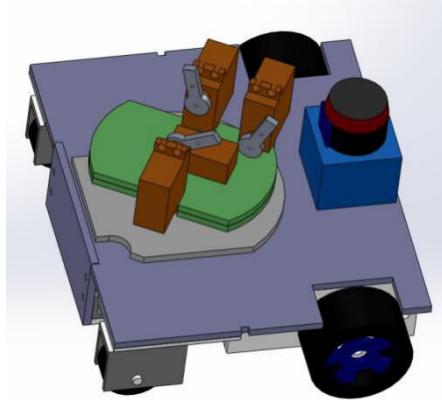


图 2-7 两轮驱动式移动平台

如图 2-7 所示，移动平台采用通用的两轮驱动方式，前部有两个主动轮，尾部装一对万向轮作辅助，控制简单、运动平稳。由于子机器人的尺寸不能太大，为防止机械臂工作时底盘发生倾覆，设计时必须尽可能降低其重心。因此，整个子机器人系统的供电单元、主动轮驱动电机及其驱动模块等质量较重的配件均安装在移动平台底部，机械臂的四个驱动电机也安装在移动平台上而不是随机械臂连杆悬置在空中。

电机的选择对机械结构的设计有明显的影响，它不但直接影响移动平台的尺寸和布局，而且对移动平台的灵活性与运动精度起着重要的作用。常用的小型电机有直流电机、步进电机和舵机。其中直流电机转速高，力矩小，易于实现精确的速度控制，需要配备减速器，编码器和驱动模块等附加设备，适用作移动平台的动力电机；舵机的转速慢，力矩大，易于实现精确的角度移控制，所需安装空间小，适合用作机械臂的驱动电机。

移动平台在选型时主要考虑电机额定功率和基本转速。首先计算平台移动所需额定功率，考虑移动子机器人在混凝土路面运动的情形，假定包括机械臂连杆和抓持物整机重量在 6KG 左右，主动轮半径为 30mm，则所需的牵引力为，

$$f = k \frac{Mg}{R} = 10 \times \frac{6 \times 9.8}{30} = 19.6N \quad (2-8)$$

其中 k 为橡胶轮与混凝土之间中心动力滚动摩擦系数，取值为 10mm，若子机器人额定运行速率为 0.5m/s，则每个电机的额定功率为

$$P_{\text{额}} = fV / 2 = 4.9W \quad (2-9)$$

电机基本转速经过减速箱减速之后不应低于

$$n = 60 \times \frac{v}{2\pi R} = 159 \text{ rpm} \quad (2-10)$$

结合安装尺寸,选用 Faulhaber2342L012型直流电机,配备64:1的减速箱,可满足移动平台底盘主动轮的驱动需求。

2.3.1.2 连杆机械臂

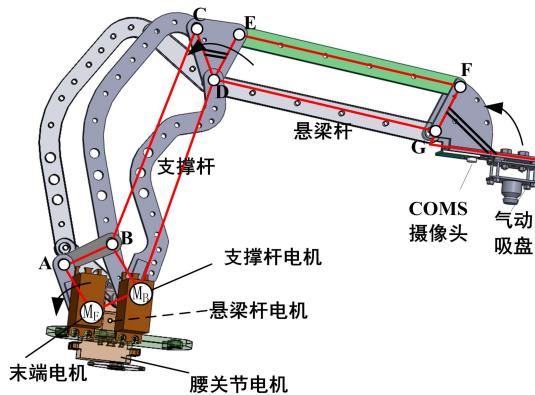


图 2-8 机械臂末端俯仰角的控制^[145]

机械臂利用多套平行四边形连杆传动以简化末端姿态的控制难度。为便于论述,将机械臂的四个驱动电机分别称为腰关节电机、支撑杆电机、悬梁杆电机以及末端电机。图2-8展示了机械臂末端俯仰姿态的传递方式,图中M_{EA}和M_BD皆为动力连杆,分别同末端电机和支撑电机的主轴固定;而连杆AB、BC、CD、DE、EF和FG两端以旋转铰链相连,均为随动连杆,此外BM_B和DG为辅助连杆,设计时使辅助连杆BM_B长度等于动力连杆M_{EA},形成平行四边形M_{EABM}_B,同样通过设置铰链间距使BM_BDC和DEFG均为平行四边形,最终机械臂末端的倾角变化等价于末端电机转角的变化,末端俯仰姿态仅受一个电机的影响,其控制更具可靠性。

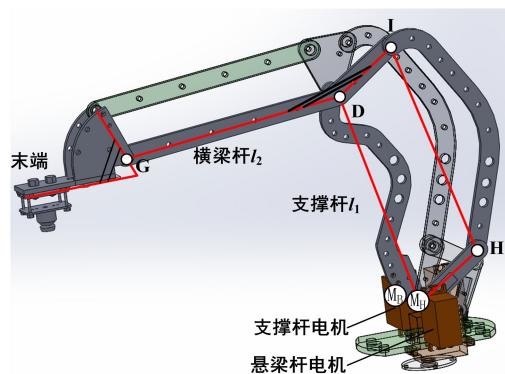


图 2-9 机械臂末端位置的控制

图2-9示意了机械臂末端位置的控制方式，其中悬梁杆电机的输出轴同动力连杆M_HH相固定，同样利用平行四边形连杆M_HHID传递M_HH的运动，悬梁杆GD的水平倾斜角仅取决于悬梁电机的转角，同支撑电机的转角无耦合关系，也就是支撑杆l₁和悬梁杆l₂的倾斜角分别由悬梁杆电机和支撑杆电机独立控制，基于简单三角几何即可简便的控制机械臂的末端位置。

连杆机械臂直接在机械传动层面降低了机械臂末端俯仰角与位置之间以及各驱动电机转角相互间的耦合关联，使各驱动电机的控制角可利用简单的三角几何关系求出，而无需进行繁琐的正/逆向运动学求解。

机械臂驱动电机选用舵机，主要考虑尺寸因素和转矩要求，为保证整体尺寸的协调性，将舵机长度和移动底盘长度之比设定在1/5左右，最终在40mm尺寸区间选用了力矩较大的Hitec HS-7950TH加强型舵机，其转矩高达38kg.cm，若不计机械臂连杆的重力矩，最多可支承机械臂末端以38cm的臂展长度抓持1kg物品。

2.3.1.3 控制系统设计

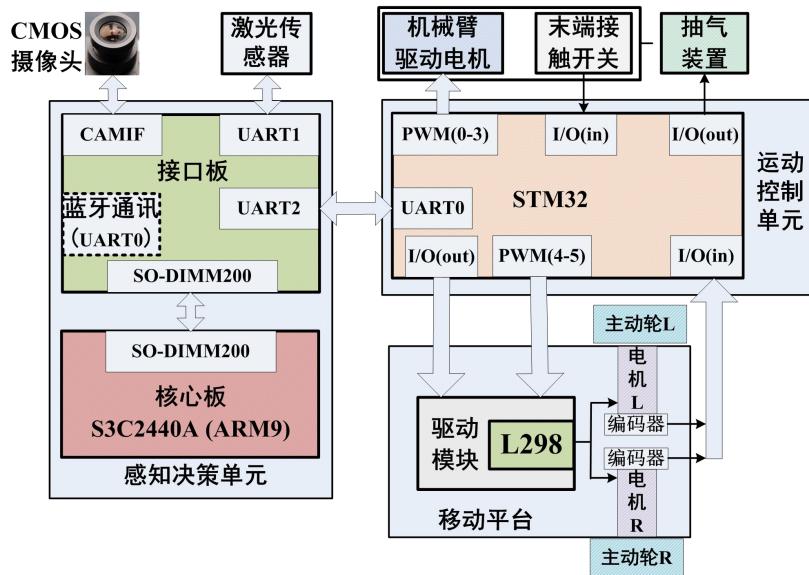


图 2-10 移动机械臂控制系统的硬件结构框图

1) 硬件平台

移动机械臂控制系统的硬件结构框架如图2-10所示，由感知决策单元和运动控制单元两部分组成。其中，感知决策单元主要负责摄像头和激光传感器的信息采集处理，运动决策，与外部系统进行数据交互；运动控制单元解析来自感知决策单元的运动指令，输出执行机构的运动控制信号，包括机械臂的各个关节角度、抽气装置的激活与否、移动平台驱动电机的转速和方向，此外还需要采集相关驱动电机的

编码器信号以及机械臂末端接触开关信号。

感知决策单元由核心板和接口板组成，其中核心板是整个系统的核心单元，对运算性能、尺寸和能耗有较高的要求，采用嵌入式处理器。ARM 系列嵌入式处理器经过多年发展，有较高的性能指标（运算快、尺寸小、能耗低）以及完备的开发环境。感知决策单元的核心板采用 ARM9 系列下的 S3C2440A 微处理器，它工作频率为 406MHz，具备稳定的 MMU、AMBA BUS 和 Harvard 高速缓冲体系结构，支持大/小端方式、高速总线模式和异步总线模式等数据传输模式，此外还支持多种型号的 ROM 引导，如 NOR/NAND Flash、EEPROM 等，本核心板利用 NAND Flash 启动引导，另外为了增加代码容量，保证运行流畅，外扩了 NAND Flash 存储器和 SDRAM 存储器。接口板上除采集 CMOS 摄像头数据所需的 CAMIF 接口、采集激光传感器和沟通感知决策单元的通讯串口（UART）、同外部进行无线通讯的蓝牙串口外，还配有提供电力的电源接口、烧写程序的 JTAG 接口等，另外核心板与接口板之间通过 SO-DIMM200 接口连接^[146]。

CMOS 摄像头模块和激光传感器采集工作环境数据，经 SO-DIMM200 接口，存入 SDRAM 存储器中；ARM 处理器从 NAND FLASH 存储器中调用启动代码和应用程序，结合应用程序的要求，从 SDRAM 存储器中读取数据并进行处理，将处理结果及所做出的运动决策经 SO-DIMM200 接口、相关串口发送给外部通讯网络、运动控制单元。

运动控制单元基于 STM32 单片机设计，其串口 UART0 接收来自感知决策单元的控制信息，处理后发给相应的执行器。其中，机械臂动作指令被解析为各电机转角信息并以 PWM 波形式送给四个电机；而移动平台轮子转动指令被解析为驱动电机的转速和方向信息，分别以 PWM 波和 I/O 口电平信号的形式传出，进入移动平台后经过以 L298 电机驱动芯片为核心的驱动模块转变为电机转子上的驱动电压。需要指出的是机械臂采用舵机驱动，内部配备角位传感器自带转角闭环控制电路，而移动平台采用直流电机驱动，需在电机转轴末端配编码器，感知电机转动并生成脉冲信号传输给 STM32 单片机 I/O 管脚，经测速后以 PWM 脉宽调节电机驱动电压，从而实现电机转速的闭环控制。

2) 软件框架

移动机械臂系统的软件框架(见图 2-11)根据硬件结构分为感知决策层和运动控制层，前者包含任务规划模块、信息处理模块和算法应用模块，在感知决策单元的 S3C2440A 微处理器中运行；后者由运动控制模块、机构监控模块和底层驱动模块组成，在运动控制单元中的 STM32 中运行。

■ 任务规划模块

任务规划模块根据任务需求(目标抓取、巡航、物品放置等),给出执行任务相应的规划。例如,将抓取任务划分为搜索、趋近和拾取等阶段;

■ 信息处理模块

信息处理模块采集来自 CMOS 摄像头和激光传感器的数据,以及来自机构监控模块的吸盘接触信号、主动轮转速、里程等数据进行处理,得到图像目标特征、环境轮廓信息、自身位置坐标,底盘航向等信息,送入算法应用模块以实现算法的闭环控制。

■ 算法应用模块

结合任务规划和来自传感模块的相关信息,调用相应的任务执行算法。例如结合摄像头信息进行图像伺服使机械臂末端对准待操作物品,输出机械臂末端位姿控制量;结合当前位置、航向、障碍物轮廓以及巡航的阶段性目的地坐标来计算最佳航向,输出移动平台的线速度和角速度控制量;最后将相关的运动控制命令打包发送给运动控制层。

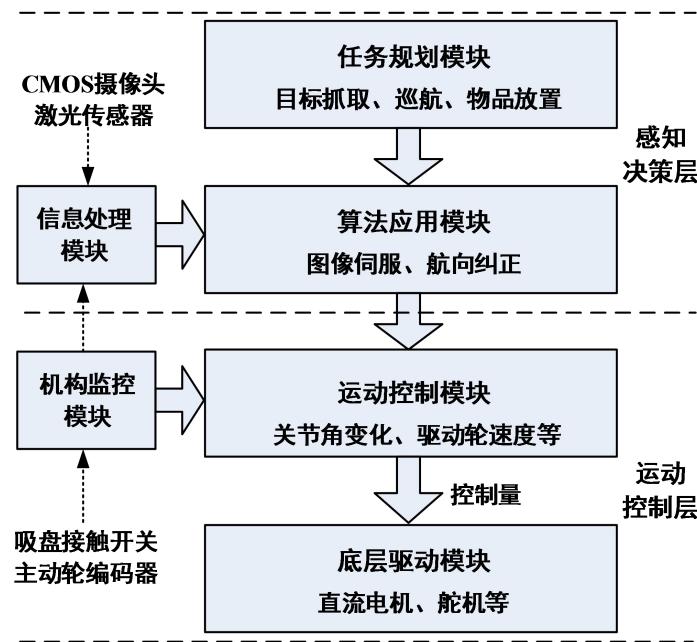


图 2-11 移动机械臂控制系统的软件框架

■ 运动控制模块

运动控制模块综合算法应用模块和机构监控模块的数据,解析出机械臂的各关节控制角以及移动平台的左右主动轮转速,换算为驱动电压值送给底层驱动模块。并根据机构监控模块中的编码器数据形成速度闭环控制,根据吸盘末端接触开关的信号,激活或关闭抽气装置。

■ 机构监控模块

机构监控模块读取吸盘末端接触开关信号，根据电机编码器数据计算出左右主动轮的转速和里程，最后将速度、里程信号和吸盘接触开关信号打包成机构状态数据发送给信息处理模块。

■ 底层驱动模块

底层驱动模块负责根据来自运动控制模块的控制量对相应的执行器(即舵机和直流电机)进行驱动。控制电机转向的 I/O 口电平，并基于驱动电压值，基于 STM32 的定时器，调制舵机转角和电机驱动电压的 PWM 波脉宽。PWM 波的宽度取决于 STM32 中定时器的计数寄存器 OCR 值，记舵机的工作角度为 $[\alpha_L, \alpha_U]$ ，其相应的控制脉冲范围为 600us~2100us，要使舵机运动到角度 α ， OCR 取值如下：

$$OCR = \frac{20 * 10^3 - (\frac{1500\alpha}{(\alpha_U - \alpha_L) / 2} + 600)}{20 * 10^3} * RC \quad (2-4)$$

其中， RC 是 STM32 中管理 PWM 分频的寄存器设置值。

为了便于感知决策层和运动控制层之间的信息传递，对控制命令以及机构状态数据进行规范化处理，具体如下：

```

STRUCT COMMAND_DATA
    //感知决策层给运动控制层的控制命令结构
{
    BYTE CheckData; //校验码
    INT ManipulatorData[4];
        //机械臂控制数据(腰关节转角/末端高度/臂展开距离/末端倾角)
    LONG bodyVelocity[2]; //本体控制数据(线速度、角速度)
    BYTE EndData; //终止码
}
STRUCT BODY_STATE_DATA
    //运动控制单元给感知决策单元的机构状态数据
{
    BYTE CheckData; //校验码
    LONG DriveWheel[4];
        //主动轮测量数据(左轮转速/右轮转速/左轮里程/右轮里程)
    BIT SuckTouch; //吸盘接触开关状态
}

```

```

    BYTE EndData; //终止码
}

```

2.3.2 履带型视觉子机器人

履带型视觉子机器人采用紧凑的履带式结构，配备一个 CMOS 摄像头，借助摄像头下方的数字舵机使其能围绕竖直方向转动，从而可灵活的获取环境图像信息。其控制系统类似于轮式移动机械臂所采用的系统，依然采用 ARM9 嵌入式处理器和 STM32 单片机分别构建感知决策单元和运动控制单元，如图 2-12 所示。ARM9 采集 CMOS 的图像信息，经过处理后进行运动决策，通过蓝牙模块与系统外部进行数据交互，另外为增加环境图像数据的存储量，添加了 MiniSD 接口模块用来扩展存储介质；STM32 单片机根据决策结果控制摄像头的转角，驱动左右履带运动。

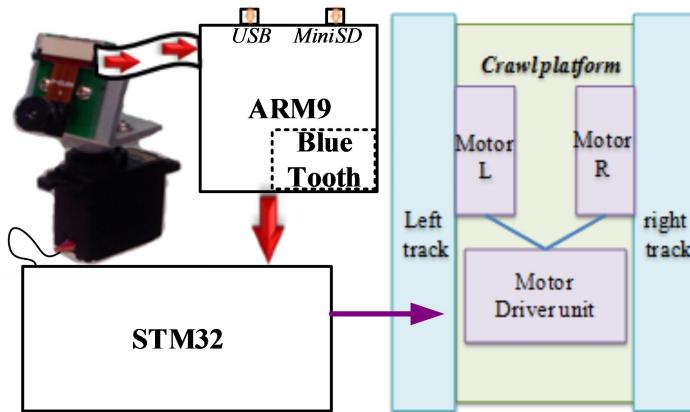


图 2-12 履带型视觉子机器人控制系统

2.4 子母式机器人系统通讯框架

子母机器人系统包含一个母机器人以及多个子机器人，要实现内外部的交互，一个合理的通讯框架是必需的。考虑到子机器人的能源有限，不宜采用功率较大的远程通讯设备，故选用蓝牙通讯模块进行短距离通讯，可由母机器人中继信号。为了保证通讯顺畅，我们设计了图 2-13 所示的通讯框架。其中，在子母式机器人系统的工作场合中增加了网络节点，基于 TCP/IP 协议远程登陆母机器人的板载 PC，同时母机器人加装高增益蓝牙适配器与各子机器人互联，作为中继站对所有子机器人的信息数据进行采集和整理。

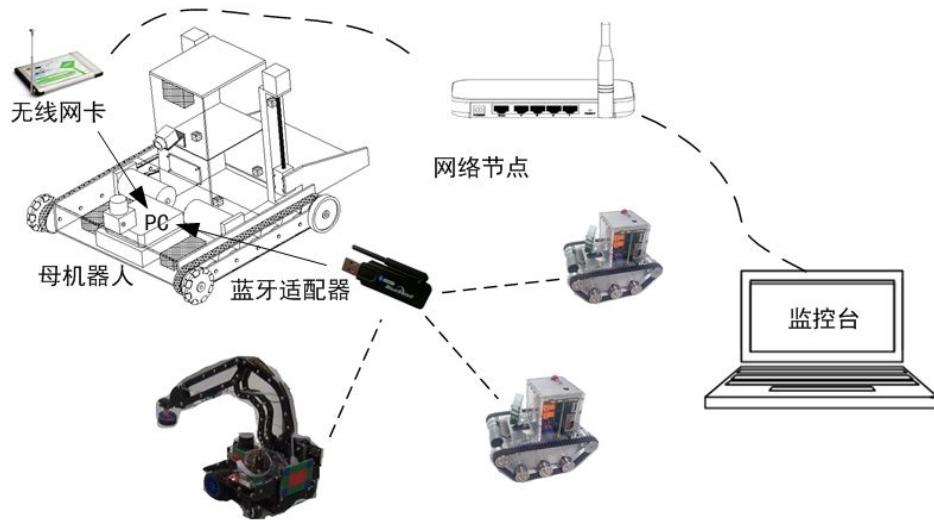


图 2-13 子母式机器人通讯框架

其中所交互信息的数据格式如下：

```
STRUCT COMMUNICATION_DATA
{
    BYTE CheckData; //校验码
    INT RobotID; //子机器人编号
    LONG EnvirData, Taskcode, State; //环境信息、任务状态等
    BYTE EndData; //终止码
}
```

2.5 子母式机器人系统样机

按照上述设计，研制完成了母机器人及两种子机器人，其中母机器人板载PC采用NFD10工控机，24V/10AH锂电池组，母机器人机械结构中支撑件和外壳封装件分别以铝合金板材和有机玻璃板材制作。子机器人的实验样机采用12V/3AH锂电池组供电，通过LM2596和LM1117电源芯片分别为核心板STM32提供5V和3.3V的运行电压，轮式移动机械臂样机的支撑件和外壳封装件分别采用人工树脂板材和有机玻璃板材制作，履带型视觉子机器人样机则由铝合金材料制作。样机图片和参数表如下。

表 2-1 母机器人参数

参数		值	
尺寸(长×宽×高)		65cm×50cm×45cm	
重量(空载/满载)		16kg/32kg	
子机器人载额(含升降平台挂载)		3	
子舱尺寸(长×宽×高)		20cm×19cm×17cm	
升降平台负载上限 (重量/长×宽)		10kg/25cm×25cm	
速度		0.8m/s	
续航时间		2.5h	
板载 PC	无线通讯	300M网卡/2.4GHZ蓝牙适配器	
相关参数	接口	RS232×5, RS485×1, USB2.0×6	
传感模块	摄像头	像素	150 万
		图像格式	SXGA、VGA、QVGA、CIF 等
		数据格式	YUV、YCrCb、RGB、Row RGB
	激光	测量距离	4 m
		测量范围	240°
		角分辨率	0.36°

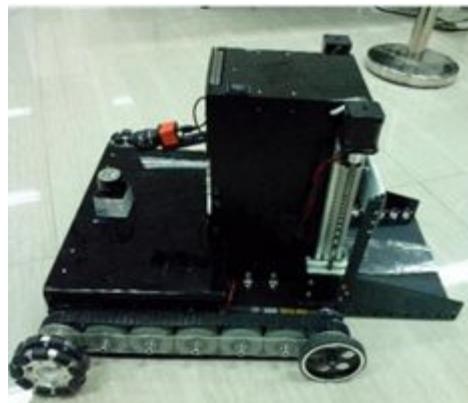


图 2-14 母机器人样机

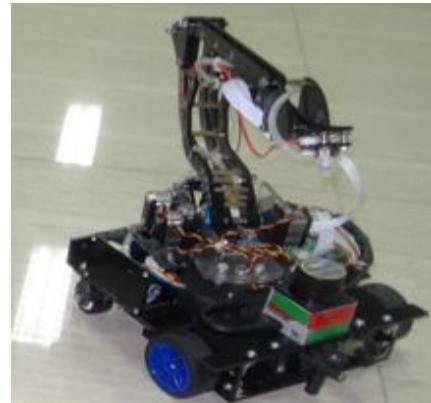


图 2-15 轮式移动机械臂样机

表 2-2 轮式移动机械臂参数

参数	值		
尺寸	23cm×22cm×25cm		
重量	6kg		
驱动轮直径	6cm		
两驱动轮之间的距离	21cm		
速度	0.5m/s		
机械臂主要活动范围参数以及结构参数	腰关节转动范围	70~250°	
	支撑杆 l_1 倾角范围	-15~90°	
	横梁杆 l_2 倾角范围	-45~45°	
	末端倾角范围	-10~30°	
	l_1 、 l_2 、 l_3 长度	$l_1=l_2=19\text{cm}$, $l_3=5\text{cm}$	
传感模块	CMOS 摄像头	像素	130 万
		图像格式	SXGA、VGA、QVGA、CIF 等
		数据格式	YUV、YCrCb、RGB、Row RGB
	激光传感器	测量距离	4 m
		测量范围	240°
		角分辨率	0.36°
抓取重量		300g(吸盘吸合力上限)	
运行时间		1h-1.5h	
无线通讯		2.4G 蓝牙模块	



参数	值
尺寸	18cm×17cm×16cm
重量	5kg
速度	0.5m/s
摄像头	CMOS
运行时间	1h-1.5h
无线通讯	2.4G 蓝牙模块

图 2-16 履带型视觉子机器人样机及其参数

图2-17显示了子母机器人系统样机的组合图片，其中母机器人其满载时可负载三个子机器人，双层回收舱装载两个履带型视觉子机器人，升降平台装载一个轮式移动机械臂。



图 2-17 子母式机器人系统样机。

为了验证所研制的轮式移动机械臂的作业能力，我们进行了物体拾取并放入指定存放区的实验，其中被拾取的物体贴有视觉标识，存放区为一红色矩形区域。图 2-18 给出了实验视频截图，可以看出，移动机械臂利用机械臂末端的 CMOS 摄像头完成对物品的识别和对准，并利用末端吸盘装置拾取物品，随后携带物品抵达指定存放区周围，将物品放置于红色矩形区域内，最终成功完成了物品拾取和存放操作，这验证了设计的合理性。

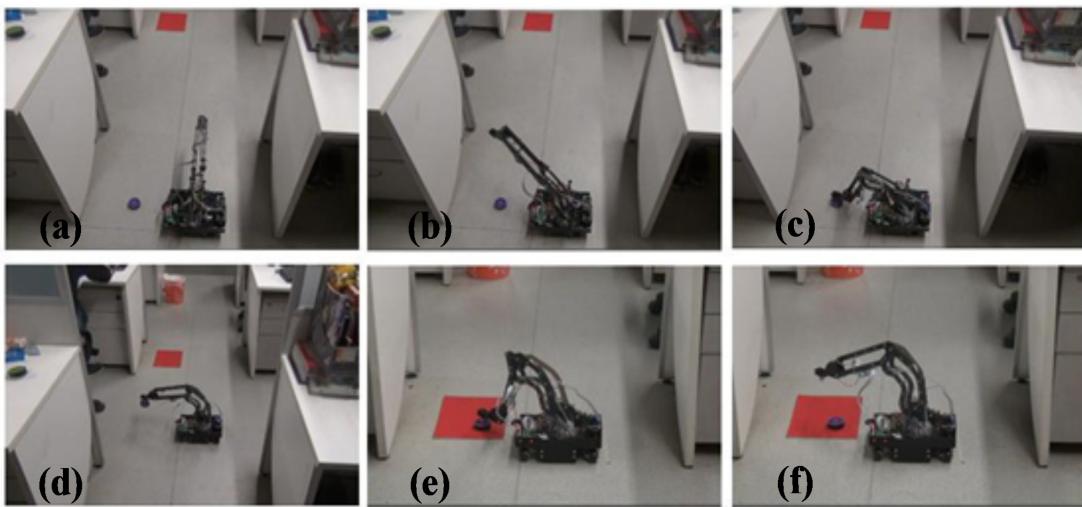


图 2-18 移动机械臂拾取物体并放置于指定区域实验的视频截图。

(a)~(c) 拾取物品；(d)~(f) 将物品转移至指定区域

图2-19所示的实验视频截图展示了所设计母机器人对子机器人进行装载和调度

的能力。在实验初始阶段，一个子机器人在母机器人回收舱入口的前方等待入舱，另一个子机器人装载在第二层子舱中等待出舱活动。首先母机器人将升降平台降至地面，落地后借助蓝牙模块给等待入舱的子机器人发出运动指令，子机器人前进直到触发第一层子舱中的接触开关，如图2-19(a)-(c)所示。随后，母机器人将升降平台上升至第二层子舱，给等待出舱作业的子机器人发送出舱指令，该子机器人进入升降平台在其接触开关上先产生一个上升沿随后产生一个下降沿，此时子机器人完全位于升降平台内，母机器人将发送暂停指令给子机器人；待升降平台落地后，发出指令使子机器人退出升降平台(见图2-19(d)-(f))。

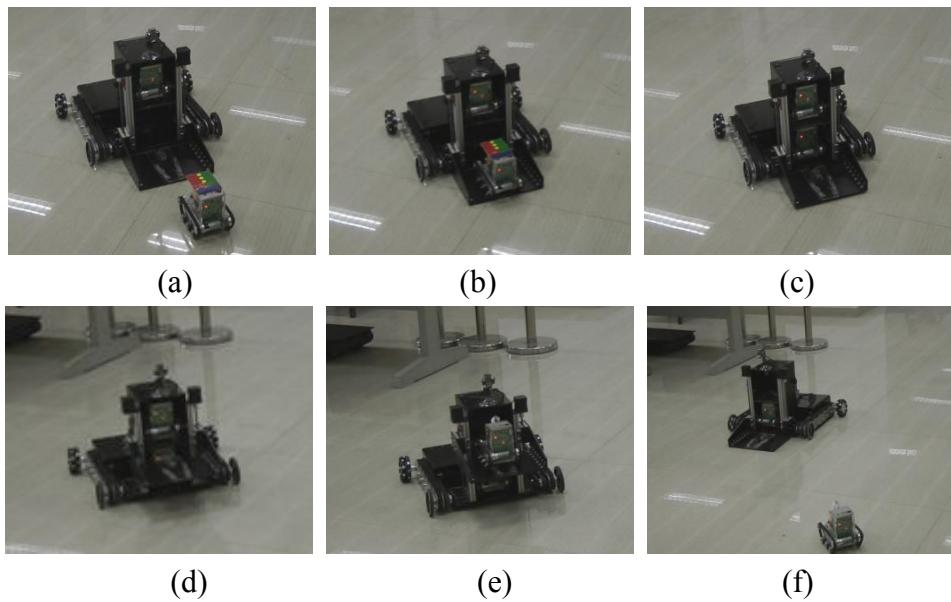


图 2-19 母机器人装载和调度子机器人实验。(a)~(c)一子机器人进入第一层子舱;
(d)~(f)释放第二层子舱中的子机器人

2.6 本章小结

本章设计了一种子母式多机器人系统，包含母机器人和两款功能不同的子机器人，为母机器人系统配备了升降式回收舱和混合式移动平台，基于板载PC配置了母机器人的控制系统。设计了轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人两种子机器人，前者采用轮式移动平台和连杆机械臂，控制简便，适宜于微小型嵌入式控制系统；后者利用非常有限的空间配备了具有旋转功能的CMOS摄像头，可灵活捕捉环境图像。最后介绍了研制的子母式机器人系统实验样机，并通过实验展示了子机器人拾取物品和搬运的能力，以及母机器人对子机器人灵活装载和调度的能力。

第3章 子机器人协调作业研究

3.1 引言

对于一母多子式异构多机器人系统来说，子机器人脱离母机器人后相互之间的协调协作是一个重要的研究内容，是有效提升任务完成效率的重要手段。本章以狭窄环境中物品的更换为研究对象，开展子机器人协调作业的研究。母机器人将不同的子机器人即轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人运送至作业地点，其中前者作为系统的leader，后者载有替换物品；这两个机器人离开母体后，以leader-follower形式巡航至指定位置，待轮式移动机械臂将需要目标物品更换为替换物品后，它们一同返回。这个过程需要解决如下问题：第一，如何探测环境障碍并实现leader的实时自定位，从而能巡航至指定位置并返回？第二，follower如何感知和调整相对leader的位姿，从而实现对leader动态的跟随？第三，如何准确的抓取、转移物品，完成更换作业？本章针对这些问题展开研究，设计了一种基于激光传感器和编码器信息融合的快速自定位算法，以及follower基于嵌入式视觉的相对位姿视觉测量算法，并采用离轴点方式实现对leader的动态跟随；另外，简化leader机械臂的eye-in-hand控制方式以降低机械臂执行物品更换作业的难度。

3.2 基于激光传感器和编码器融合的自定位算法

Leader配有激光传感器，采集其感知范围内障碍物外轮廓的距离值。通过对这些原始数据进行分割与拟合，提取出少量的线段特征数据，进而通过线段匹配并融合编码器信息的方式实现自定位。

3.2.1 基于激光数据的轮廓线段快速提取

传统的线段提取算法通常需要对原始数据进行滤波、聚簇和迭代分割，在嵌入式设备的应用中具有局限性。为此，本章考虑按顺序读取这些离散的距离点值，直接进行折点、断点检测，随即进行线段分割或拟合，仅需一次遍历而无需迭代运算即可拟合出需要的线段特征。为了便于算法论述，首先以激光传感器的中心 O_L 建立位姿坐标系 $\{L\}$ (见图3-1)，将第*i*个激光测距的原始值记为 C_i 。

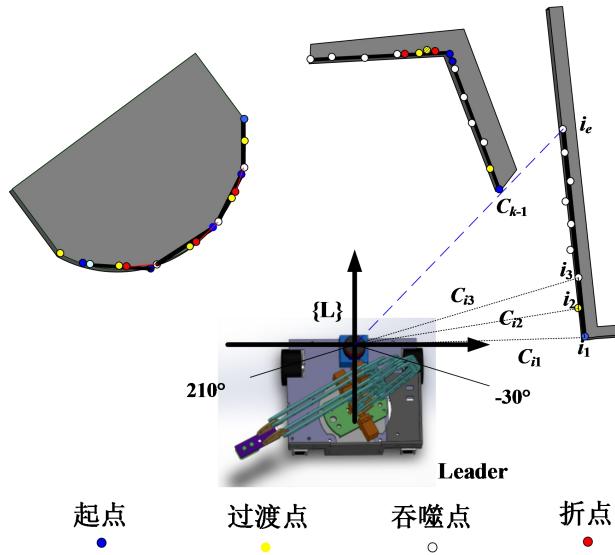


图 3-1 轮廓线段的提取

算法在逆时针依次读取原始距离值的同时，按照过渡线生成、线段确认、吞噬生长、折点处理和断点处理五种状态处理该距离值，在遍历结束后完成全部原始数据的分割及提取。若当前所读取的距离值 C_k 同上一点的 C_{k-1} 的差值超出给定的落差阈值 $\Delta C=5\text{cm}$ ，标记 C_k 所对应的点为断点。

◆ 过渡线生成

如图 3-1 所示，激光测得第 i_1 个距离值 C_{i1} 为有效值，定义最小线段长度为 $2a$ ，将 i_1 作为起点，继续往后读取距离值，若在断点出现之前，发现第 i_2 个值 C_{i2} 满足式(3-1)，即连线距离 d_{i1-i2} 不小于给定的有效轮廓线段长度阈值 a ，将 i_2 标记为过渡点，接下来进入线段确认状态。

$$d_{i1-i2} = \sqrt{C_{i1}^2 + C_{i2}^2 - 2C_{i1}C_{i2} \cos[(i_2 - i_1) \times \Delta\delta]} \geq a \quad (3-1)$$

其中 $\Delta\delta$ 为激光传感器的分辨角。

◆ 线段确认

读取过渡点 i_2 之后的数据，参照式(3-1)得出满足 $d_{i2-i3} \geq a$ 的 i_3 点后，按下式计算过渡线 i_1-i_2 和 i_2-i_3 之间的偏离角 $\Delta_{i1-i2-i3}$ ：

$$\Delta_{i_1-i_2-i_3} = \left| 180^\circ - \arccos\left(\frac{\sqrt{C_{i2}^2 + d_{i1-i2}^2 - C_{i1}^2}}{2C_{i2}d_{i1-i2}}\right) - \arccos\left(\frac{\sqrt{C_{i2}^2 + d_{i2-i3}^2 - C_{i3}^2}}{2C_{i2}d_{i2-i3}}\right) \right| \quad (3-2)$$

如果其值小于给定折线偏离角阈值 β_{th} ($\beta_{th}=20^\circ$)，则 i_3 点被标记为首个吞噬点 i_n ，确认线段 i_1-i_n 为有效线段，进入吞噬生长状态；若大于 β_{th} 则进入折点处理状态。

◆ 吞噬生长

继续读取吞噬点 i_n 之后的数据，找到点 i_{n+1} 满足 i_n-i_{n+1} 间距不小于阈值 a ，则参照式(3-2)计算偏离角 $\Delta_{i_1-i_n-i_{n+1}}$ ，如果该角度值超出阈值 β_{th} ，则点 i_{n+1} 记为折点，进入折点处理；否则， i_{n+1} 被标记为新的吞噬点，更新 i_1-i_{n+1} 为有效线段并继续吞噬生长状态，直到识别出折点或断点。跳转前将最后的吞噬点记录为末端点 i_e ，然后利用最小二乘直接法拟合 i_1-i_e 之间的点，进而得到相应轮廓线段特征 $S_i(\theta_i, d_i, \theta_{si}, l_i)$ ，其中，线段起始点角度 $\theta_{si}=i_1\times\Delta\delta-30^\circ$ ，线段长度 l_i 即 d_{i1-i_e} ，法向角 θ_i 和垂线长度 d_i 对应原点到线段的垂足的极坐标参数，线段直线的描述式为：

$$\begin{cases} x \cos \theta_i + y \sin \theta_i = d_i \\ d_i \geq 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

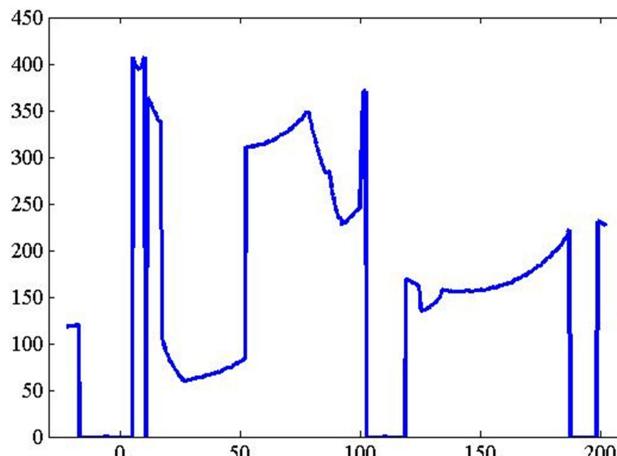
◆ 折点处理

在吞噬生长阶段发现折点，则将末端吞噬点后移一位作为新线段的起点，该折点后移一位作为新线段的过渡点；若发生在线段确认状态，则将当前的起点和折点各自后移一位，随后继续进行线段确认。

◆ 断点处理

若断点出现在线段确认之前，当前过渡线被忽略；若在吞噬生长阶段，则以 C_{k-1} 所对应的点为末端点 i_e 提取轮廓线段。

在遍历完全部的原始数据后即可得到一个线段特征包 $\{N, S_1, S_2, \dots, S_N\}$ ，其中 N 为有效线段的条数， S_i 即为每一条线段的四维特征向量。



(a)

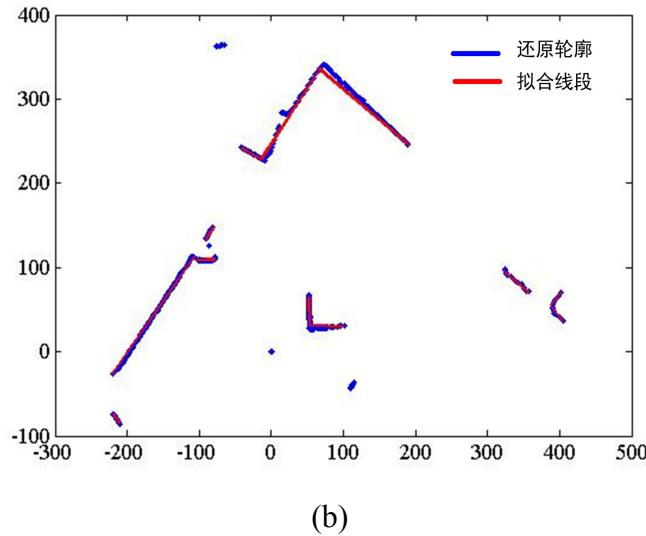


图 3-2 激光原始数据与轮廓线段提取结果。
 (a) 原始激光测距值极坐标数据;
 (b) 原始数据还原轮廓与提取线段结果的对比

图 3-2 为算法处理结果的一个实例，其中图(a)描述了所有原始数据以极坐标形式绘制的测距曲线，其横坐标对应测距角度，纵坐标对应相应的激光距离；图(b)的蓝色线条表示将图(a)中的极坐标数据还原到二维平面中的轮廓数据，而红色线条表示采用上述算法分割原始数据所提取出的线段，共计分割出 12 条线段，可以看出拟合后数据量小，轮廓信息基本被保留下来。

3.2.2 基于线段特征匹配的位姿计算

Leader 提取出线段特征后参照以前的历史线段特征进行匹配关联，计算其在全局坐标系 $\{M\}$ 中的实时位姿 $P(x, y, \epsilon)$ (ϵ 为 leader 的航向)。传统 SLAM 算法进行匹配时，会对所拟合线段进一步计算，延长相邻线段将其交点定义为“路标点”作为匹配对象，这一方面会增加计算量和存储量，另外一方面在相邻线段夹角小的情况下，微弱角度误差可能会导致“路标点”偏移较大。这里直接对线段特征进行匹配和位姿计算，首先基于垂线长度、线段起始点角度以及线段长度进行预匹配，再统计预匹配线段对间法向角的差值，根据最密集偏差角确认有效线段对，利用线段对的法向角偏差和垂线长度差值解算出 leader 在历史位姿坐标系 $\{L_m\}$ (见图 3-3) 中的位姿，再根据 $\{L_m\}$ 在 $\{M\}$ 中的位姿 P^m 计算出 leader 在 $\{M\}$ 中的位姿。每间隔一段距离阈值 d_{th} 或转角阈值 ϵ_{th} ，更新历史位姿。

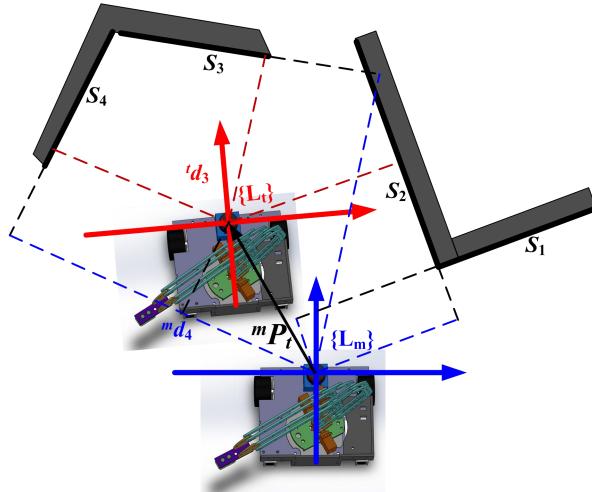


图 3-3 线段特征匹配

a) 线段匹配

见图3-3中， $\{L_m\}$ 和 $\{L_t\}$ 分别为历史位姿坐标系和当前位姿坐标系。可以看出，虽然激光传感器处于不同位姿所检测到的线段数量不一定相同，但相匹配线段（图中的 S_2 、 S_3 和 S_4 ）垂线长度的差值不超过坐标系平移范围，大部分相匹配线段出现顺序和长度较为接近，尤其是法向角的差值一致于两个坐标系的旋转量，因此线段匹配可分两步进行：首先利用线段特征数据中的后3个特征（即线段垂线长度 d_j 、线段起始角 θ_j 和线段长度 l_j ），基于宽松特征约束预匹配，得到预匹配线段对集合 $\mathbf{G}\{F_k(s_k, {}^m s_k, {}^{t-m} \theta_k), k=1, 2, 3, \dots\}$ ；而后，统计集合 \mathbf{G} 中的法向角差值 ${}^{t-m} \theta_k$ ，将分布最密集的法向角差值 ${}^{t-m} \theta_{max}$ 作为坐标系旋转量 $\Delta\epsilon$ ，进而找出有效线段匹配对。

算法 3.1 线段特征预匹配

输入：当前线段特征包 $\{N_t, {}^t S_1, {}^t S_2, \dots, {}^t S_{N_t}\}$ ，以及历史线段特征包 $\{N_m, {}^m S_1, {}^m S_2, \dots, {}^m S_{N_m}\}$ 。

输出：预匹配线段对集合 \mathbf{G} 。

```

1  $k \leftarrow 0$ ;
2 for  $i = 1 : N_t$ 
3   for  $j = 1 : N_m$ 
4     if  $({}^t d_i \in [{}^m d_j - \eta_d d_{th}, {}^m d_j + \eta_d d_{th}] \&\& {}^t \theta_i \in [{}^m \theta_j - \eta_\epsilon \epsilon_{dth}, {}^m \theta_j + \eta_\epsilon \epsilon_{dth}] \&\&$ 
         ${}^t l_j / {}^m l_j < \eta_l \&\& {}^m l_j / {}^t l_j < \eta_l)$ 
5        $F_k({}^t s_k, {}^m s_k, {}^{t-m} \theta_k) \leftarrow (i, j, {}^t \theta_i - {}^m \theta_j);$ 
6        $k++;$ 
7   end
8 end
9 end

```

线段特征预匹配详见算法3.1，其中 F_k 表示一个预匹配线段对，其包含三个参量

分别表示来自当前线段特征包中线段的编号 $'S_k$, 历史线段特征包中线段的编号 $''S_k$, 以及法向角偏差 ${}^{t-m}\theta_k$ 。 $\eta_d=1.4$, $\eta_e=1.2$, $\eta_f=2$ 为相应宽松特征约束的系数, d_{th} 和 ε_{th} 为给定的间隔阈值。

b) 位姿计算

在得到有效线段匹配对后, 再结合所匹配线段的垂线长度的差值得出平移向量。以图3-3中的轮廓线段 S_4 为例, 其在坐标系 $\{L_m\}$ 对应的线段标号为 $''S_4$, 直线方程为:

$$x \cos {}^m\theta_4 + y \sin {}^m\theta_4 = {}^m d_4 \quad (3-4)$$

其在 $\{L_t\}$ 相匹配的线段标号为 $'S_3$, 相应的直线方程为

$$x \cos {}^t\theta_3 + y \sin {}^t\theta_3 = {}^t d_3 \quad (3-5)$$

其中

$${}^t\theta_3 - {}^m\theta_4 = \Delta\varepsilon \quad (3-6)$$

以坐标 $\{L_m\}$ 描述的坐标平移向量记为 ${}^m P_t(a, b)$, 其在 ${}^m S_4$ 垂线上的投影长为:

$$a \cos {}^m\theta_4 + b \sin {}^m\theta_4 = {}^m d_4 - {}^t d_3 \quad (3-7)$$

相似的, 所有匹配线段对 $('S_i, {}^m S_j)$ 的相应特征数据满足:

$$\begin{cases} a \cos {}^m\theta_j + b \sin {}^m\theta_j = {}^m d_j - {}^t d_i \\ {}^t\theta_i - {}^m\theta_j = \Delta\varepsilon \end{cases} \quad (3-8)$$

以式(3-8)为基础, 通过最小二乘法即可计算出相对平移向量 ${}^m P_t(a, b)$ 。需要指出的是, 长线段所蕴含的位姿信息更为显著和准确, 在线段匹配阶段统计法向角的差值 ${}^{t-m}\theta_k$ 或在利用最小二乘法解算相对平移向量 ${}^m P_t$ 时, 将线段长度作为加权系数用于提高长线段的比重, 有利于提高整体位姿计算精度。

3.2.3 基于激光和编码器数据的分频融合定位

在环境轮廓相似度过高或者提取的轮廓线段数量过少等情况下, 单纯基于激光的定位容易发生较严重的失真, 此时可以借助编码器数据加以改进。利用编码器定位虽然会因为累计误差导致远距离定位不准, 但短距位移测量的准确度高, 即编码器定位具有低频易失真但高频可信的特点; 基于激光的定位可以较好的克服累计误差, 即低频可信度高, 但定位结果或多或少会因提取底层特征而带来细微的偏差, 高频噪音不可避免。本章针对该特点设计了融合框架, 在利用编码器定位筛选失真激光定位结果的基础上, 进一步对两种定位结果进行高/低通分频融合。

a) 编码器的高频定位-计算短距位姿增量

Leader采用左右轮差动驱动方式, 其短距位姿增量 $\Delta P^c(\Delta x^c, \Delta y^c, \Delta \varepsilon^c)$ 按照式(3-9)计算。

$$\begin{cases} \Delta\epsilon^c = \frac{2(\Delta C_L - \Delta C_R) \pi R}{NB} \\ \Delta x^c = \frac{(\Delta C_L + \Delta C_R) \pi R}{N} \cos(\epsilon^* + \Delta\epsilon^c / 2) \\ \Delta y^c = \frac{(\Delta C_L + \Delta C_R) \pi R}{N} \sin(\epsilon^* + \Delta\epsilon^c / 2) \end{cases} \quad (3-9)$$

其中, $\Delta C_L, \Delta C_R$ 分别为左右电机的编码器增量, N 为编码器单圈脉冲总数, R 为主动轮的半径, B 为左右驱动轮的间距, $P^*(x^*, y^*, \epsilon^*)$ 是上一帧定位结果。

b) 激光的低通滤波定位

线段特征匹配得到了当前位姿在历史位姿坐标系 $\{L_m\}$ 的描述 $(a, b, \Delta\epsilon)$, 结合 $\{L_m\}$ 在全局坐标系 $\{M\}$ 中的位姿 $P^m(x^m, y^m, \epsilon^m)$ 即可得当前 leader 在 $\{M\}$ 中的定位结果 $P^L(x^L, y^L, \epsilon^L)$ 。

$$\begin{cases} x^L = a \cos \epsilon^m - b \sin \epsilon^m + x^m \\ y^L = a \sin \epsilon^m + b \cos \epsilon^m + y^m \\ \epsilon^L = \epsilon^m + \Delta\epsilon \end{cases} \quad (3-10)$$

为抑制高频噪音, 采用阻滞式低通滤波更新激光定位的结果:

$$\begin{cases} \tilde{x}^L = (1-\lambda_p)x^L + \lambda_p x^* \\ \tilde{y}^L = (1-\lambda_p)y^L + \lambda_p y^* \\ \tilde{\epsilon}^L = (1-\lambda_r)\epsilon^L + \lambda_r \epsilon^* \end{cases} \quad (3-11)$$

其中 λ_p 和 λ_r 分别为平移阻滞系数和旋转阻滞系数。

考虑到基于线段匹配计算位姿时, 旋转增量是通过统计匹配线段集合的最密集法向角差值的方式产生的, 其高频可靠性一般高于基于最小二乘法所得的位移增量, 在设计阻滞系数时, 旋转阻滞系数 λ_r 可略低于平移阻滞系数 λ_p 。

c) 融合框架

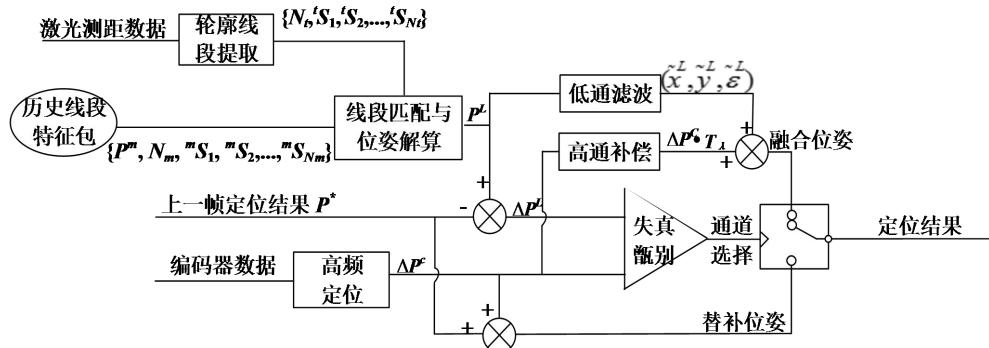


图 3-4 激光和编码器数据融合自定位框架

如图 3-4 所示, 基于线段匹配的定位结果 P^L 同上一帧定位结果 P^* 作差得到一个

位移增量 ΔP^L , 而后和编码器的高频定位结果 ΔP^c 作比较, 进行失真甄别, 如果相差不大则认为激光定位结果可信, 然后用编码器高频定位结果 ΔP^c 乘以系数向量 $T_\lambda(\lambda_p, \lambda_p, \lambda_R)$ 来补偿激光定位低通滤波后的结果所带来的阻滞延迟量, T_λ 的参数与低通滤波所用系数相一致; 如果激光定位结果失真, 则直接将编码器高频定位结果累加上一帧定位结果作为本次的替补位姿输出。

3.3 Leader-follower 相对位姿测量及跟随方法

对于移动机械臂 leader 和履带型视觉子机器人 follower 来说, leader 可能由于转动而使得其尾部的引导标识从 follower 的视野中消失。要解决此问题, 需要 follower 判别 Leader 的当前航向, 这就要求 follower 能够感知较为完整的相对位姿, 除了感知与 leader 的相对距离和方位外, 还应感知其航向。下面首先给出一种嵌入式视觉平台下的测量方法。

3.3.1 基于搜索树的图像特征提取算法

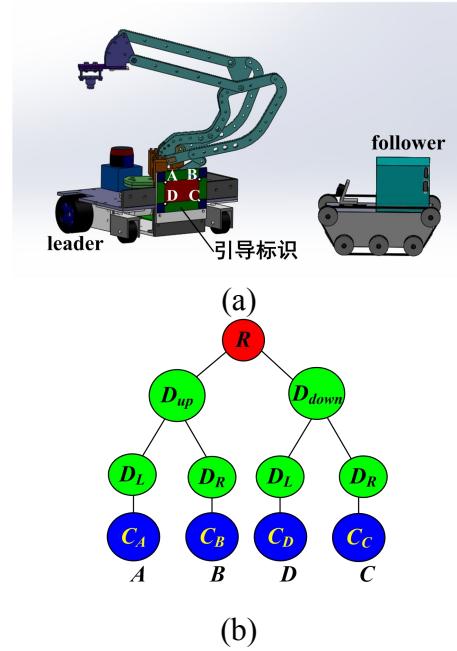


图 3-5 引导标识的角度提取。 (a) Leader 尾部引导标识; (b) 图像处理二分搜索树

如图 3-5(a)所示, 首先在 Leader 尾部设置由不同颜色矩形块构成的引导标识, 引导标识中央是一个红色矩形块, 周围被绿色和蓝色矩形块环绕。视觉测量需提取的红色矩形块的四个角点 A 、 B 、 C 和 D 。为保证识别效率, 采用图 3-5(b)所示树形顺序加速这四个角点的提取: 分别将红、绿、蓝三种颜色定义为根节点色 $R(\text{root})$,

区分色 D (differentiate)和确认色 C (confirm)，其中区分色又有 D_{up}/D_{down} 上下和 D_L/D_R 左右之分。处理图像时首先搜索根节点色 R ，随后沿着二分搜索树搜索上下邻近像素是否为区分色 D_{up}/D_{down} ，若是则进一步搜索左右邻近像素是否为区分色 D_L/D_R ，最后判别相应方向的斜对角是否为确认色 $C_A \sim C_D$ 中的一种。最终在搜索树的帮助下使整个图像处理过程经过一次遍历即可找到并区分出红色矩形块的四个角点，将它们在图像平面中的坐标分别记为 $I_A(u_a, v_a), I_B(u_b, v_b), I_C(u_c, v_c)$ 和 $I_D(u_d, v_d)$ 。

3.3.2 基于弱旋转约束简化 p4p 视觉测量

红色矩形块尺寸及其四个角点的图像坐标已知，因而可利用 p4p 算法即可进行笛卡尔空间位姿解算，这通常需要多次迭代去修正景深距离，再加上角点提取耗时，测量算法在嵌入式平台上难以实时进行。考虑到 leader 和 follower 运动时其俯仰自由度和横滚自由度是受平面约束的，虽然在运行过程中会发生一定程度的颤动和起伏，导致这种旋转约束并不严格，但仍可在这种非严格的约束中找到一个相对稳定的位姿参数或者说高阶稳定分量，并基于该分量设计简化的视距测量模型，快速计算出逼近实际情况的景深距离，最终提高算法的实时性。

a) 相对位姿的高阶稳定分量 ΔZ_{CH}

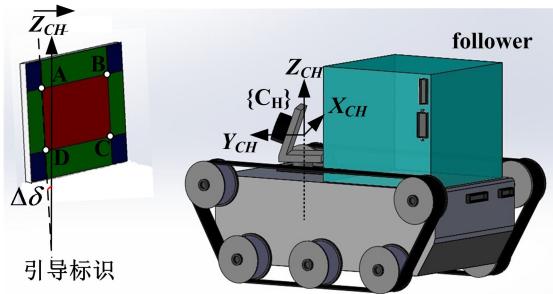


图 3-6 引导标识与摄像头偏航坐标系 $\{C_H\}$

图 3-6 所示为以 follower 的摄像头为原点，以数字舵机转轴方向(竖直方向)为 Z_{CH} 轴建立摄像头偏航坐标系 $\{C_H\}$ ， Y_{CH} 轴平行于水平面且和摄像头偏转方向一致， X_{CH} 轴根据笛卡尔坐标系右手法则确定。理想情况即在严格旋转约束下，leader、follower 的航行角转轴以及摄像头转轴均完全垂直于地面，此时图中所示的引导标识的上下角点连线向量 \vec{CB} / \vec{DA} 相对于轴向量 $\vec{Z_{CH}}$ 的倾斜角 $\Delta\delta=0$ 。而实际情况下这种约束关系并不严格，即 $\Delta\delta$ 接近但却不等于 0，此时，利用泰勒级数多项式展开计算 A, D (或 B, C)两端点在坐标系 $\{C_H\}$ 中的相对位姿向量，即向量 \vec{DA} ($\Delta X_{CH}, \Delta Y_{CH}, \Delta Z_{CH}$)，有：

$$\begin{cases} \Delta X_{CH} = H \cos \theta_{CH} \sin \Delta \delta = \Delta \delta H \cos \theta_{CH} + o(\Delta \delta) \\ \Delta Y_{CH} = H \sin \theta_{CH} \sin \Delta \delta = \Delta \delta H \sin \theta_{CH} + o(\Delta \delta) \\ \Delta Z_{CH} = H \cos \Delta \delta = H + o(\Delta \delta) \end{cases} \quad (3-12)$$

其中，红色矩形块的宽度值 H 即为 \vec{DA} 模长，有 $H=|\vec{DA}|$ ， θ_{CH} 为 \vec{DA} 在 $X_{CH}O_{CH}Y_{CH}$ 平面上的投影线向量角。

由式(3-12)可知分量 ΔX_{CH} 和 ΔY_{CH} 的偏差区间为 $\Delta \delta$ 的同阶无穷小，而 ΔZ_{CH} 的值为宽度值 H 与 $\Delta \delta$ 高阶无穷小的和。举例说明，若倾斜角 $\Delta \delta=5^\circ$ ，在 H 取 50mm、 θ_{CH} 取 45° 时，可以计算出 $\vec{DA}=(3.08\text{mm}, 3.08\text{mm}, 49.81\text{mm})$ ，而在严格约束条件下 $\vec{DA}=(0, 0, 50\text{mm})$ ，即分量 ΔZ_{CH} 的偏差仅为 $50-49.81=0.19\text{mm}$ ，比 ΔX_{CH} 和 ΔY_{CH} 的 3.08mm 要小一个数量级。因此在弱约束偏差角 $\Delta \delta$ 较小条件下，分量 ΔZ_{CH} 为高阶稳定分量。

b) 基于高阶稳定分量 ΔZ_{CH} 的视觉测量模型

利用棋盘格靶标进行摄像头参数标定可以得到摄像头偏航坐标系 $\{C_H\}$ 到图像平面的变换矩阵 $M^{[147]}$ 。

$$z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{CH} \\ Y_{CH} \\ Z_{CH} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

$$M = M_{in}^* {}^c M_{CH} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \quad (3-14)$$

其中， (X_{CH}, Y_{CH}, Z_{CH}) 为某点在摄像头偏航坐标系坐标系 $\{C_H\}$ 中的坐标， (u, v) 为该点在图像平面中的投影坐标； M_{in}^* 为摄像头内参矩阵增广矩阵， ${}^c M_{CH}$ 为摄像头相对偏航坐标系 $\{C_H\}$ 的外参，由于 $\{C_H\}$ 以摄像头为原点，因此 ${}^c M_{CH}$ 最后一列向量(平移向量)为 0 向量，从而在标定 ${}^c M_{CH}$ 时只需保证平面靶标姿态。

基于引导标识的四个角点图像坐标，结合式(3-14)，有：

$$\begin{cases} {}^c z_a \begin{pmatrix} u_a \\ v_a \\ 1 \end{pmatrix} - {}^c z_d \begin{pmatrix} u_d \\ v_d \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X_{CH} \\ \Delta Y_{CH} \\ \Delta Z_{CH} \end{pmatrix} \\ {}^c z_b \begin{pmatrix} u_b \\ v_b \\ 1 \end{pmatrix} - {}^c z_c \begin{pmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X_{CH} \\ \Delta Y_{CH} \\ \Delta Z_{CH} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3-15)$$

其中， ${}^c z_a$ 、 ${}^c z_b$ 、 ${}^c z_c$ 和 ${}^c z_d$ 分别为四个角点相应的景深距离。

经变换后可得

$$\begin{pmatrix} {}^C z_a \\ {}^C z_d \\ {}^C z_b \\ {}^C z_c \\ \Delta X_{CH} \\ \Delta Y_{CH} \end{pmatrix} = \Delta Z_{CH} A^{-1} \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \\ m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

其中，

$$A = \begin{pmatrix} u_a & -u_d & 0 & 0 & -m_{11} & -m_{12} \\ v_a & -v_d & 0 & 0 & -m_{21} & -m_{22} \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -m_{31} & -m_{32} \\ 0 & 0 & v_b & -v_c & -m_{11} & -m_{12} \\ 0 & 0 & u_b & -u_c & -m_{21} & -m_{22} \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -m_{31} & -m_{32} \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

直接将引导标识中红色矩形块的宽度值 H 作为 ΔZ_{CH} 带入式(3-17)，即可计算出四个角点的景深距离。随后，利用式(3-18)即可得到四个角点在摄像头偏航坐标系 $\{C_H\}$ 中的位置。

$$\begin{pmatrix} X_{CH} \\ Y_{CH} \\ Z_{CH} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} & m_{32} \end{pmatrix}^{-1} \left(\begin{pmatrix} u {}^C z \\ v {}^C z \\ {}^C z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_{14} \\ m_{24} \\ m_{34} \end{pmatrix} \right) \quad (3-18)$$

其中， (u, v) 即为四个角点的图像坐标 $I_A(u_a, v_a), I_B(u_b, v_b), I_C(u_c, v_c)$ 和 $I_D(u_d, v_d)$ 。

随后，计算出引导标识的 A, D 的中点和 B, C 的中点在 $\{C_H\}$ 中的坐标 $E({}^{CH}x_E, {}^{CH}y_E, {}^{CH}z_E)$ 、 $F({}^{CH}x_F, {}^{CH}y_F, {}^{CH}z_F)$ ，建立牵引坐标系 $\{G\}$ ，如图 3-7 所示，以 EF 的连线作为 X_G 轴，取 EF 在水平面上的垂直平分线为 Y_G 轴。进而，得到摄像头在牵引坐标系 $\{G\}$ 中的姿态 ${}^G C({}^G x_c, {}^G y_c, {}^G \varepsilon_c)$ ：

$$\begin{cases} {}^G \varepsilon_c = -a \tan[({}^{CH} y_E - {}^{CH} y_F)/({}^{CH} x_E - {}^{CH} x_F)] + \pi/2 \\ {}^G x_c = -\sin {}^G \varepsilon_c ({}^{CH} x_E + {}^{CH} x_F)/2 + \cos {}^G \varepsilon_c ({}^{CH} y_E + {}^{CH} y_F)/2 \\ {}^G y_c = -\cos {}^G \varepsilon_c ({}^{CH} x_E + {}^{CH} x_F)/2 - \sin {}^G \varepsilon_c ({}^{CH} y_E + {}^{CH} y_F)/2 \end{cases} \quad (3-19)$$

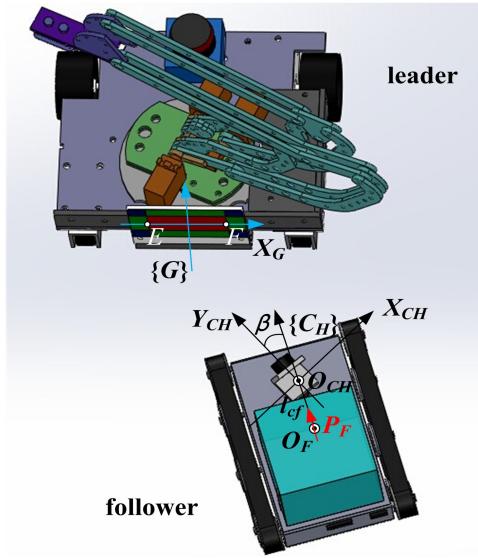


图 3-7 牵引坐标系 $\{G\}$ 与 follower 的跟随位姿

若 follower 摄像头相对其本体的偏转角为 β , 摄像头相对本体的质心偏移距离为 l_{cf} , 可计算出 follower 在 $\{G\}$ 中的跟随位姿 $P_F(x_F, y_F, \psi_F)$, 其中 ψ_F 表示 follower 本体在牵引坐标系 $\{G\}$ 中的偏航角。

$$\begin{cases} \psi_F = {}^G\varepsilon_C - \beta \\ x_F = {}^Gx_C - l_{cf} \cos {}^G\varepsilon_F \\ y_F = {}^Gy_C - l_{cf} \sin {}^G\varepsilon_F \end{cases} \quad (3-21)$$

3.3.3 基于离轴点的跟随策略

Follower 对 leader 进行跟随时, 涉及摄像头朝向和本体航行位姿的控制。前者需要控制摄像头舵机的转向角 β , 使摄像头对准引导标识, 具体实现需要将 A 、 B 、 C 、 D 四个角点的图像横坐标均值作为反馈量, 保持其在图像平面竖直平分线附近, 进行简单的闭环控制即可; 后者需要调节 follower 左右侧履带的平均速度 v_m 和左右差速 v_d , 控制其相对 leader 的偏航角和航距尽可能的使其沿着 leader 的轨迹航行。Leader 沿直线行驶时, follower 只需要使航向对准引导标识, 根据所给定的滞后航迹长度 S_d 控制相互之间的距离即可实现跟随, 若 leader 沿圆弧航行, follower 需采用基于虚机器人离轴点跟踪的控制策略。

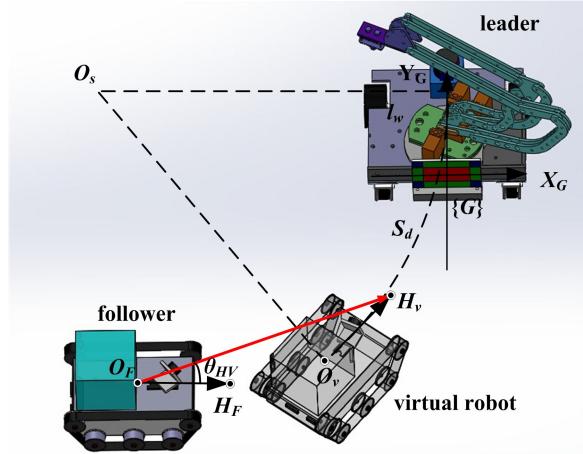


图 3-8 基于虚机器人离轴点跟踪的圆弧跟随

如图 3-8 所示, 根据虚机器人离轴点跟踪的控制策略^[148], 需要给出虚机器人的位姿, 首先计算 leader 的瞬时轨迹半径 R_s :

$$R_s = \frac{v_R + v_L}{2|v_R - v_L|} B_L \quad (3-22)$$

其中, B_L 为 leader 左右轮的间距, v_R 和 v_L 分别为左右驱动轮的速度。若 $v_R > v_L$, 轨迹圆心在牵引坐标系 $\{G\}$ 中坐标为 $O_s(-R_s, l_w)$; 若 $v_R < v_L$, 则为 $O_s(R_s, l_w)$, 其中 l_w 为左右驱动轮中心距其尾部引导标识的距离。再根据给定 S_d 计算 follower 在牵引坐标系 $\{G\}$ 中的期望位姿, 即虚拟机器人的位姿 $P_v(x_v, y_v, \psi_v)$ 。

$$\begin{cases} \psi_v = \pi/2 - S_d / R_s \\ x_v = R_s (\sin \psi_v - 1) & \text{if } (v_R > v_L) \\ y_v = l_w - R_s \cos \psi_v \\ \psi_v = \pi/2 + S_d / R_s \\ x_v = R_s (1 - \sin \psi_v) & \text{if } (v_R < v_L) \\ y_v = l_w + R_s \cos \psi_v \end{cases} \quad (3-23)$$

在虚拟机器人正前方偏离质心 d_{HV} 距离处设置离轴点 $H_v(x_{HV}, y_{HV})$:

$$\begin{cases} x_{HV} = x_v + d_{HV} \cos \psi_v \\ y_{HV} = y_v + d_{HV} \cos \psi_v \end{cases} \quad (3-24)$$

最后分别以 follower 质心 O_F 与离轴点 H_v 的连线向量 $\vec{O_FH_v}$ 的模长 l_{HV} , $\vec{O_FH_v}$ 同 follower 航向的夹角 θ_{HV} 为反馈量控制速度 v_F 和角速度 w_F , 相应的闭环系统采用基于位置控制的视觉伺服控制框架^[147], 如图 3-9 所示。

Follower 左右履带轮的轮速分配如下:

$$\begin{cases} v_{FL} = v_F - w_F B_F / 2 \\ v_{FR} = v_F + w_F B_F / 2 \end{cases} \quad (3-25)$$

其中, B_F 为 follower 两侧履带轮的间距。

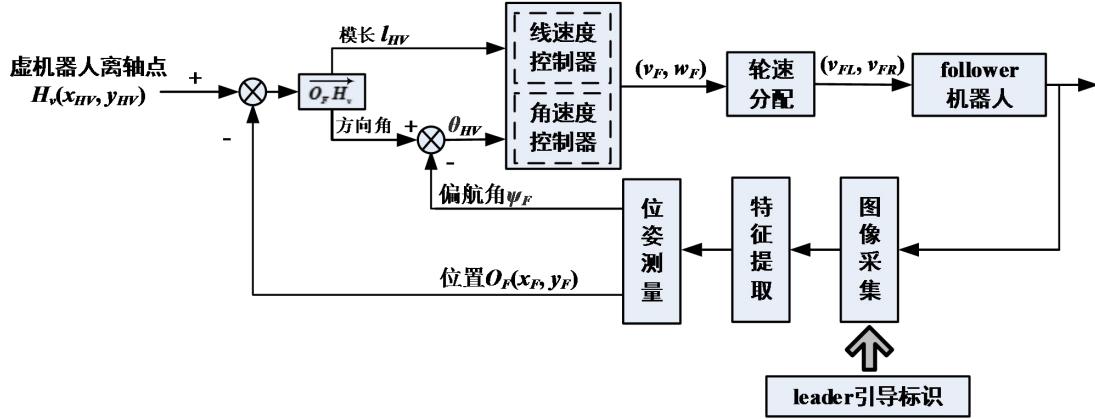


图 3-9 基于位置视觉伺服控制的离轴点跟踪

需要补充说明的是，在跟随过程中，若 follower 发现当前滞后航迹长度小于给定值 S_d 则或者不能同时捕捉四个角点，则暂缓航行，仅利用转向舵机调整摄像机转向，将引导标识保持在视野中。

3.4 物品更换操作策略

在 leader 引领 follower 携带替换物品抵达作业区并发现目标物品之后，开始物品更换流程。首先，leader 停止运动，follower 进行位姿微调以便于 leader 机械臂的操作作业(见图 3-10)；接下来 leader 以 eye-in-hand 模式将目标物品和替换物品进行替换。整个过程可分解为两个子任务：首先是 follower 微调与 leader 的相对位姿以便于机械臂的操作，其次 leader 利用机械臂末端摄像头以 eye-in-hand 模式操作物品。

3.4.1 位姿微调

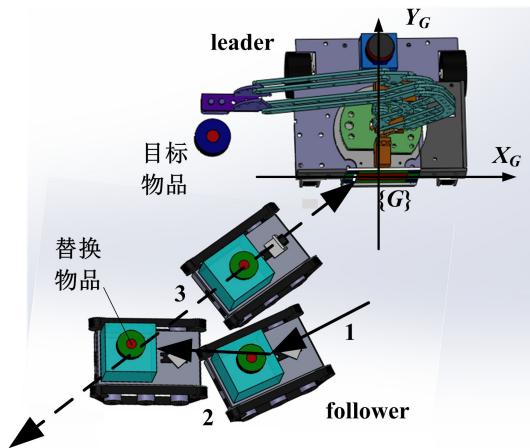


图 3-10 Follower 相对 leader 位姿微调

Follower 先向后退移，过程中逆时针调整其摄像头的转角使之对准 leader 引导标识的左侧角点 A/D，随后摄像头的转角保持不变，通过 follower 本体的退行保持 A/D 在视野中央直至适宜的方位(见图中 3-10 双箭头虚线)，随后再次调整摄像头朝向使其和本体航向一致，再利用这两个角点在图像平面中横坐标的均值调整机器人本体的航向，利用其纵坐标的差值调整相互间的距离，最终 follower 到达适于 leader 机械臂作业的位置。

3.4.2 利用柱面坐标系简化 eye-in-hand 控制方式

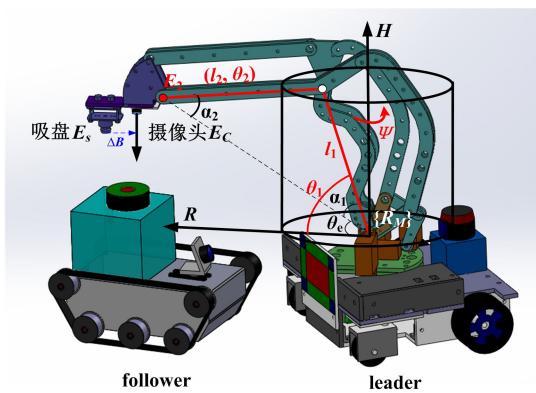


图 3-11 机械臂柱面坐标系 $\{R_M\}$

执行抓取任务时，控制机械臂末端吸盘 E_S 对准物品并趋近，直到触发吸盘上的接触开关，激活同吸盘相连的抽气装置拾取物品。在物品上贴有环状引导标识，拾

取过程利用图像伺服控制腰关节转角 θ_b 、连杆 l_1 和 l_2 的倾斜角 θ_1 及 θ_2 ，最终使末端吸盘位置 E_s 对正物品引导标识中心点。为简化视觉伺服模型，建立如图 3-11 所示机械臂柱面坐标系 $\{R_M\}$ 描述末端吸盘位置 $E_s(h_s, r_s, \Psi_s)$ ，其中 h_s 表示高度， r_s 对应臂展长度， Ψ_s 为机械臂方位角。相应的，机械臂末端摄像头和连杆 l_2 的末端点在柱面坐标系 $\{R_M\}$ 下的位置分别记为 $E_c(h_c, r_c, \Psi_c)$ 和 $E_2(h_2, r_2, \Psi_2)$ 。明显的， E_c 、 E_s 以及 E_2 具有相同方位角，相互间的高度、臂展长度差值为固定值，即这三个点在 $\{R_M\}$ 坐标系描述下具有相同的位移导数即速度矢量 $\vec{V}_{RM}(h, r, \dot{\Psi})$ ，因此在执行抓取任务时，可以利用图 3-12 所示图像伺服框架，利用物品所贴引导标识在末端摄像头图像平面中的坐标 (u_t, v_t) 及长度 s_t 首先使 E_c 对准物品并趋近，近到一定距离后按摄像头和吸盘的装配间距 ΔB 减小臂展值最终使吸盘位置 E_s 对准物品，缓慢降低高度值直至触发吸盘接触开关，最终激活抽气装置完成抓取任务。

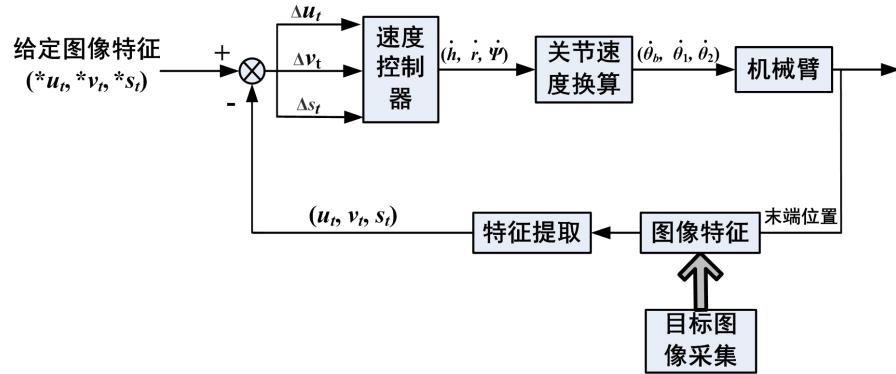


图 3-12 图像伺服框架

首先给出 $E_2(h_2, r_2, \Psi_2)$ 与 $(\theta_b, \theta_1, \theta_2)$ 的关系：

$$\begin{cases} \theta_b = \psi \\ \theta_1 = \arctan(r_2 / h_2) + \alpha \cos[(l_1^2 + s^2 - l_2^2) / 2l_1 s] \\ \theta_2 = \arctan(r_2 / h_2) + \alpha \cos[(l_2^2 + s^2 - l_1^2) / 2l_2 s] \end{cases} \quad (3-26)$$

在此基础上，可得速度矢量 $\vec{V}_{RM}(h, r, \dot{\Psi})$ 和 $(\dot{\theta}_b, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$ 的关系(见式(3-27))。

$$\begin{cases} \dot{\theta}_b = \dot{\psi} \\ \dot{\theta}_1 = \left(I - (l_2^2 + s^2 - l_1^2) / \sqrt{(l_1^2 + l_2^2 - s^2)(s^2 - (l_1 - l_2)^2)} \right) (h_2 \dot{r} - r_2 \dot{h}) / s^2 \\ \dot{\theta}_2 = \left(I - (l_1^2 + s^2 - l_2^2) / \sqrt{(l_1^2 + l_2^2 - s^2)(s^2 - (l_1 - l_2)^2)} \right) (h_e \dot{r} - r_2 \dot{h}) / s^2 \end{cases} \quad (3-27)$$

其中 $s = \sqrt{r_2^2 + h_2^2}$ 。

3.5 实验

实验1以轮式移动机械臂为实验平台，开展基于激光传感器和编码器融合自定位算法的验证。机器人运行环境如图3-13所示，环境中放置若干箱体作为障碍，任务要求机器人在该环境中基于事先的多个目标位置按顺序进行巡航。

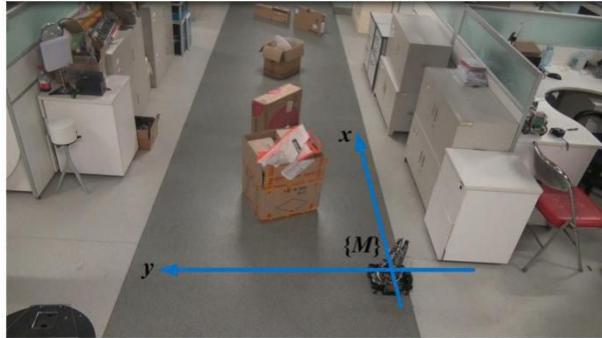


图3-13 实验1的实验环境

以轮式移动机械臂的出发位置为原点 O_M ，初始航向为 x 轴，建立全局坐标系 $\{M\}$ 。四个目标位置分别为 $A(400\text{cm}, 0\text{cm})$, $B(430\text{cm}, 30\text{cm})$, $C(470\text{cm}, 70\text{cm})$, $D(470\text{cm}, 140\text{cm})$, $E(25\text{cm}, 140\text{cm})$, 要求机器人按照预设的 $O_M \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow O_M$ 的顺序(见图3-14(a)中的蓝线)进行巡航。算法相关参数如下： $a=4\text{cm}$, $d_{th}=30\text{cm}$, $\varepsilon_{th}=30^\circ$, $\lambda_p=0.95$, $\lambda_R=0.8$ 。

实验结果如图3-14所示，其中3-14(a)对比了预定轨迹(蓝线)和基于激光传感器和编码器融合自定位的巡航轨迹(红线)，可以看出这2条轨迹基本重合，说明了定位结果具有较高的精度，在后期阶段，自定位的航向有了一定偏差，导致重合度有所下降。图3-14(b)对比了激光单独定位、编码器单独定位以及融合定位的结果，可以看出激光单独定位结果存在毛刺，高频噪音难以避免，有时甚至明显失真，而编码器单独定位虽比较平滑，但随着航迹的增加，其累计误差逐渐变大，这两者融合后的结果可避免各自的劣势从而得到较好的定位结果。图3-14(c)展示了机器人巡航过程中基于提取的线段所获得的环境轮廓地图。

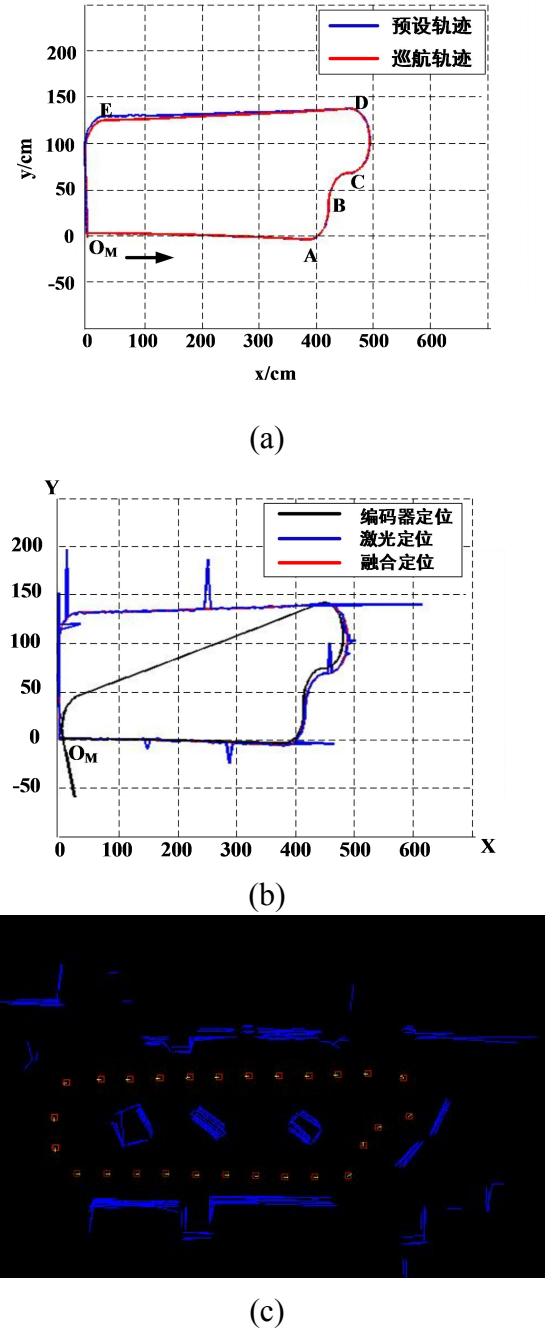


图 3-14 实验 1 的实验结果。 (a) 基于融合算法的自定位巡航结果; (b) 激光单独定位、编码器单独定位以及融合定位对比; (c) 环境轮廓地图

实验 2 用于 leader-follower 跟随算法的测试，其中 follower 为履带型视觉子机器人。Leader 以 100cm 的直径沿方桌旋转引导 follower 以滞后距离 $S_d=30\text{cm}$ 跟随，leader 尾部所安装的引导标识中红色矩形块的长 $L_R=5.6\text{cm}$ ，宽 $H=3.7\text{cm}$ 。摄像头偏航坐标系 $\{C_H\}$ 到图像平面的变换矩阵 M 为

$$M = \begin{pmatrix} 656.2169 & 334.3076 & 88.7071 & 0 \\ 14.1279 & 374.0106 & -600.5803 & 0 \\ -0.0183 & 0.9787 & 0.2043 & 0 \end{pmatrix} \quad (3-28)$$

实验2的实验结果如图3-15所示, leader、follower的运动轨迹分别用红线和蓝线绘制, 图3-16给出了跟随实验的视频截图, 可以看出借助基于弱旋转约束的相对位姿视觉测量以及离轴点跟踪的方式, 可以使得follower基本沿着leader的圆形轨迹航行。

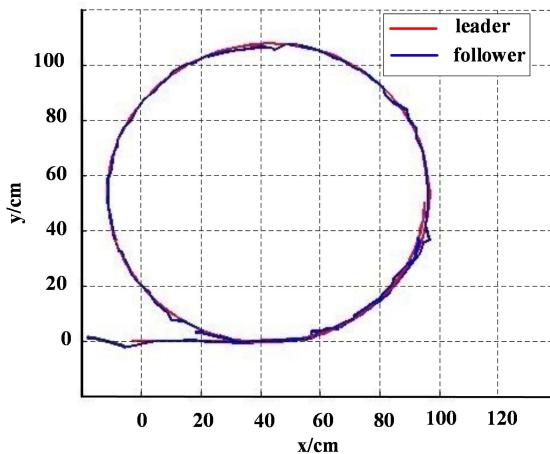


图3-15 实验2 leader 和 follower 的运动轨迹

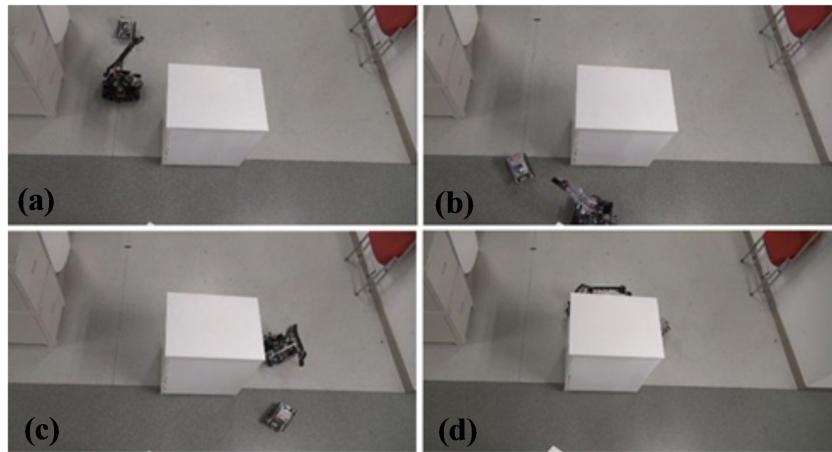


图3-16 实验2 跟随实验的视频截图(follower跟随leader做逆时针运动)

实验3用于测试物品更换操作策略。如图3-17(a)所示, 实验初始时刻将目标物品置于leader前方, follower承载替换物品位于其后方。实验开始后, follower进行位姿微调(详细微调轨迹见图3-18), 首先由起始位置 S_F 后退一段距离保证其摄像头可同时提取出四个角点以便于视觉测量其与Leader的相对位姿; 随后调整摄像头的转角使之对准leader引导标识左侧角点A/D, 围绕A/D退行直到抵达机械臂腰关节转角范围内的方位, 随后进行距离调整最终使其承载的替换物品便于机械臂的操作

作业(见图 3-17(a)-(c))。

Follower 在位姿微调结束后停止运动, leader 开始对目标物品和替换物品进行调换工作, 首先以 eye-in-hand 模式对准并抓取目标物品, 记忆此刻抓取位姿 P_M , 将物品挪置在一旁(见图 3-17(d)-(f)); 随后 leader 机械臂的腰关节旋转至替换物品所对应方位, 再次以 eye-in-hand 模式对准并抓取, 根据记忆位姿 P_M 将替换物品释放至原先目标物品所在的位置, 最后 leader 将原目标物品移至 follower 上, 顺利完成物品的更换, 如图 3-17(g)-(i)所示。

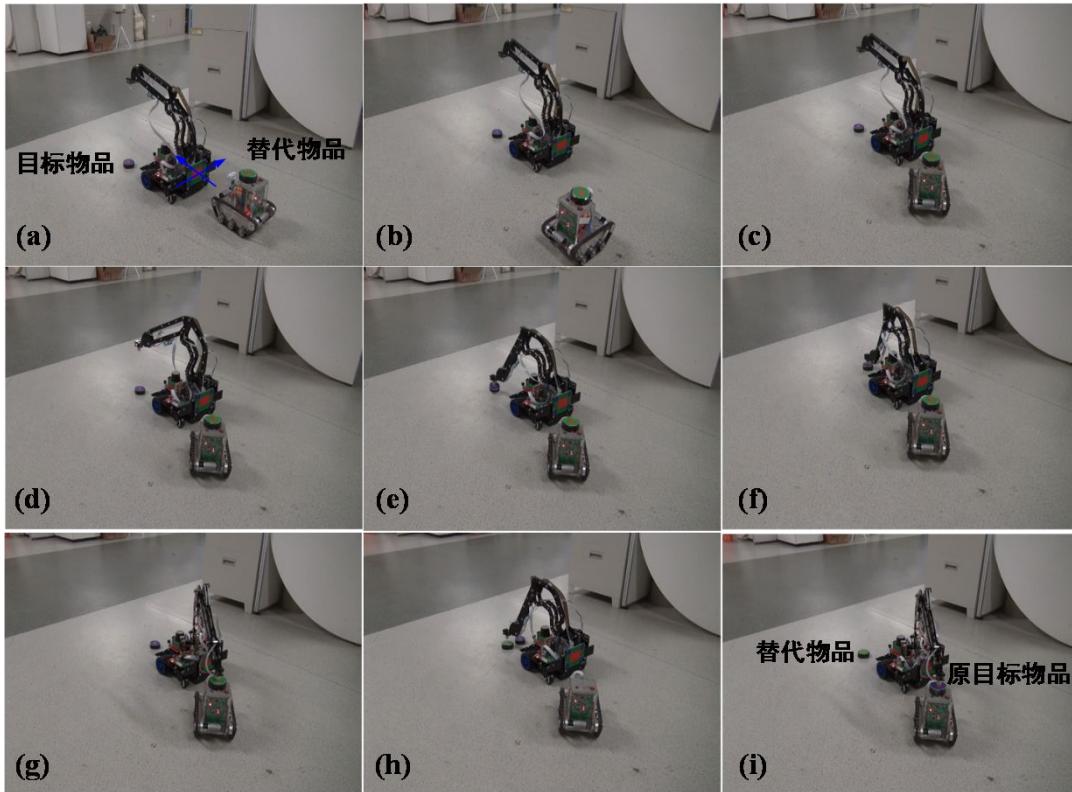


图 3-17 实验 3 物品更换视频截图。(a)~(c) follower 进行位姿微调; (d)~(f) leader 将目标物品移至一旁; (g)~(f) leader 放置替代物品并取回原目标物品

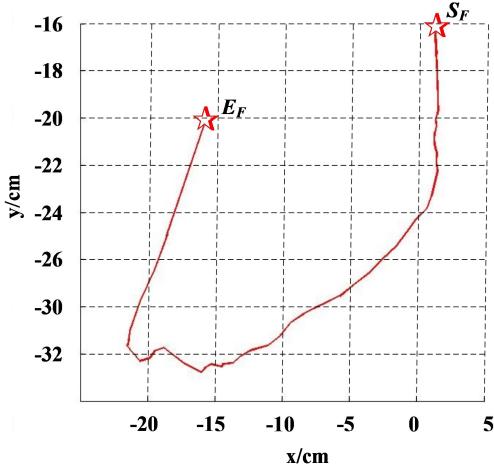


图 3-18 follower 位姿微调轨迹

实验 4 用于综合验证上述介绍的子机器人协调作业相关算法。任务要求轮式移动机械臂即 leader 出舱后引领随后出舱的履带型视觉子机器人即 follower 共同执行到指定区域进行物品更换的作业。子机器人协调物品操作任务流程示意图如图 3-19 所示。Leader 基于激光传感器和编码器融合进行自定位，根据自定位结果修正航向，沿着指定的轨迹巡航至作业位置，而 follower 则携带替换物品基于相对位姿的测量结果跟随 leader 进入作业区，并协助 leader 完成物品更换作业。最后，follower 携带原目标物品跟随 leader 返回。

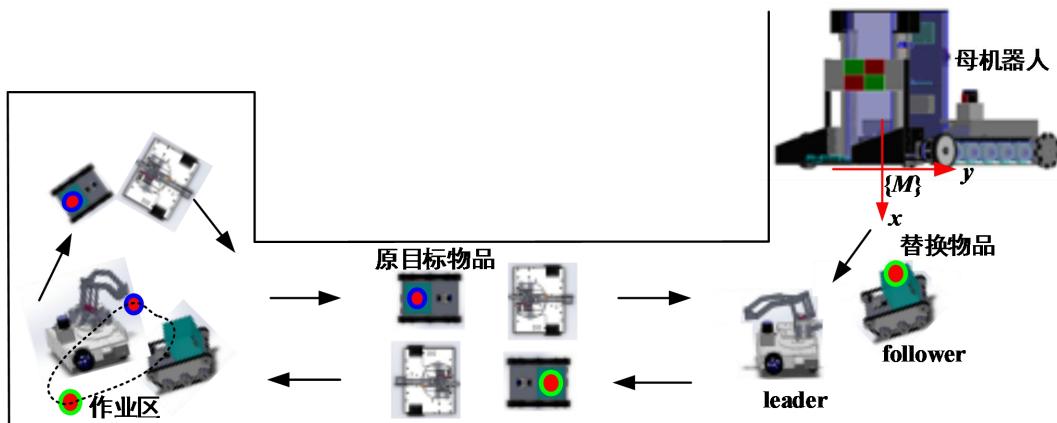


图 3-19 子机器人协调物品操作任务流程示意图

图 3-20 显示了实验 4 leader 和 follower 的运动轨迹，可以看出整个过程中 follower 基本沿着 leader 的轨迹航行，其抵达作业区后能够较好的微调相对于 leader 的位姿，并进入机械臂适宜的工作区间，最终顺利完成了物品更换作业。

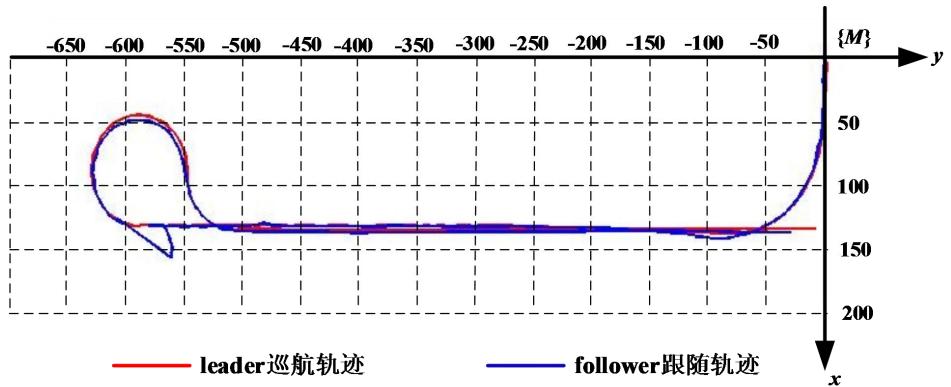


图 3-20 实验 4 leader 和 follower 的运动轨迹

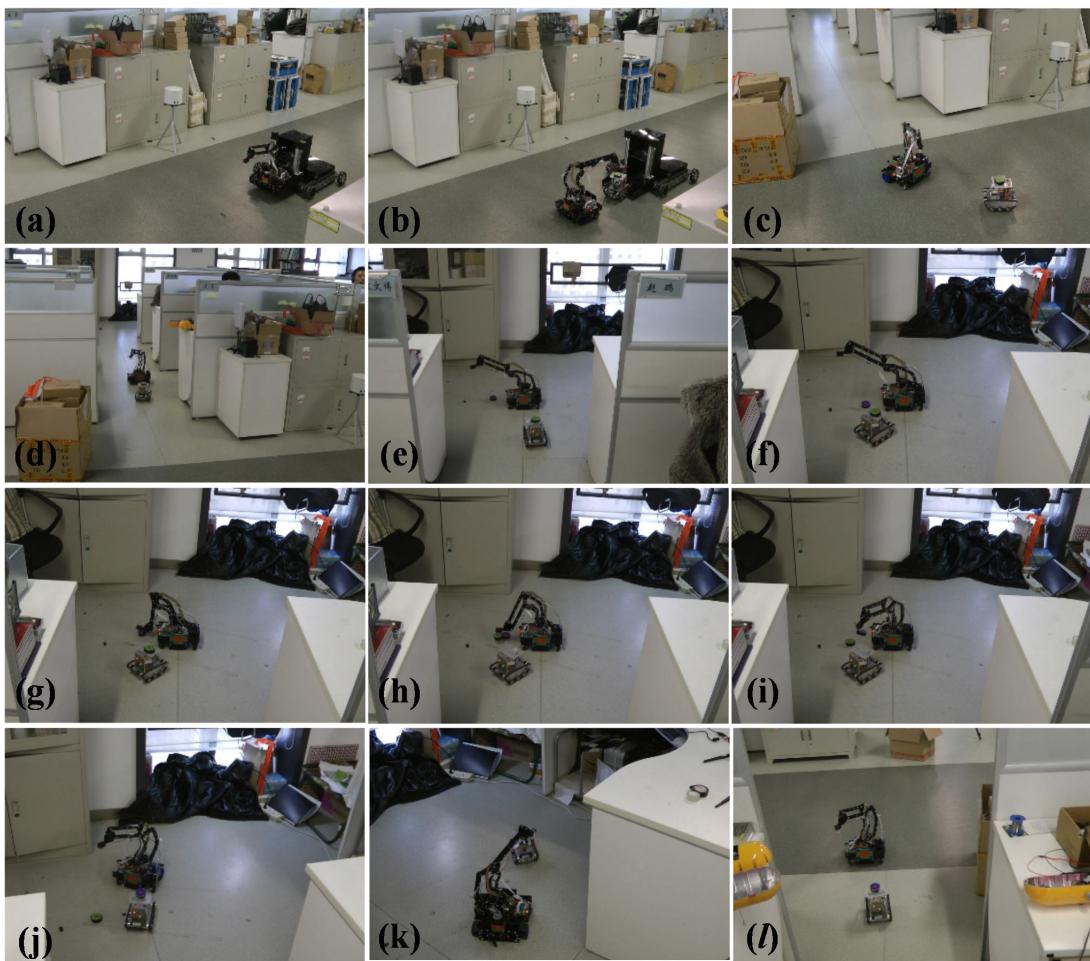


图 3-21 实验 4 视频截图。(a)~(e) 子机器人出舱, 以 leader-follower 形式巡航至指定作业位置; (f)~(i) leader 执行物品更换任务; (j)~(l) 巡航返回

图 3-21 为实验 4 的视频截图, 首先两个子机器人 leader 和 follower 离开母机器人, follower 携带替换物并在 leader 的引领下运动至指定的作业位置(见图

3-21(a)-(e)), 然后 follower 调节同 leader 的相对位姿以便于机械臂作业(见图 3-21(f))。接下来, leader 机械臂调换目标物品与 follower 所携带的替换物品(见图 3-21(g)-(i)), 最后 leader 引领着 follower 携带原目标物品返回, 如图 3-21(j)-(l)所示。整个过程中 leader 根据线段所建立的环境地图如图 3-22 所示。

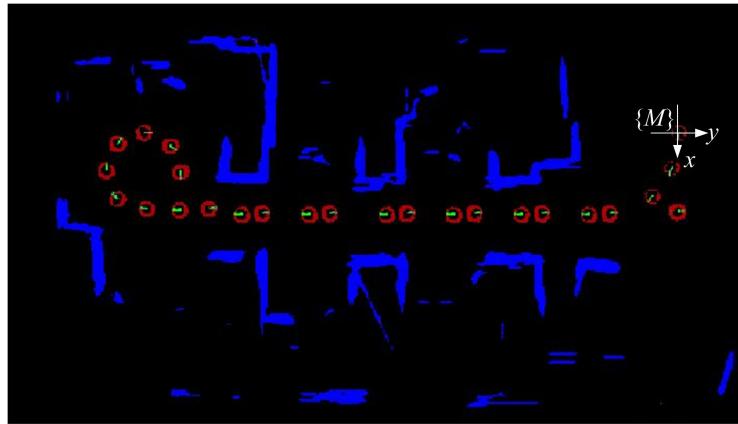


图 3-22 leader 建立的环境地图

3.6 本章小结

本章分别以轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人作为 leader 和 follower, 面向指定工作区的物品更换作业, 开展了三方面的研究工作, 主要内容如下:

- 1) 针对 leader 子机器人巡航自定位问题, 提出了一种基于激光传感器和编码器融合的自定位算法, 每一帧激光数据通过一次遍历即可处理得到相应轮廓线段, 直接以线段特征匹配得到激光定位位姿, 再根据激光定位和编码器定位的不同特点进行分频融合, 实现了机器人实时准确的自定位, 此外, leader 同步构建了基于轮廓线段的环境地图。
- 2) 针对 leader-follower 相对位姿测量问题, 提出了一种基于弱旋转约束的 p4p 视觉测量算法, 通过发掘引导标识中所隐含相对位姿的高阶稳定分量, 设计视觉测量模型, 最终实现了相对位姿的实时测量, 在此基础上采用基于离轴点的跟随策略实现了 follower 对 leader 的跟随。
- 3) 面向物品更换操作, 设计了子机器人协调策略, 由 follower 微调相对于 leader 的位姿, 使其处于机械臂所适宜的操作位置, 同时, 采用柱面坐标系简化 eye-in-hand 控制方式, 最终 leader 机械臂顺利完成物品的更换作业。

上述方法的有效性通过实验进行了验证。

第4章 基于母机器人观测指引的子机器人回收

4.1 引言

当子机器人需要转移、进行能源补充或在有害的环境中寻求庇护时，需要进入母机器人回收装置内部，这使得回收功能显得十分重要。然而由于结构和尺寸的限制，回收时不仅需要控制子机器人的位置，还要求子机器人抵达入口时必须位于入口正前方且航向垂直于入口。这种较高的位姿要求增加了入舱的难度。另外，考虑到子机器人运算能力等限制，我们首先在本章考虑利用母机器人携带传感器资源，通过观测子机器人入舱姿态进而指引子机器人完成入舱。基于母机器人观测的子机器人模糊指引回收策略，首先利用母机器人的视觉系统采集子机器人的图像，提取图像特征，分析图像特征与子机器人的航向、相对入口的方位等关键入舱位姿间的关联，在此基础上设计模糊控制器，调节子机器人航行角速度进而修正入舱位姿，实现子机器人的准确回收。

4.2 视觉信息获取

4.2.1 母机器人观测模型

如图 4-1 所示，子机器人前部设置一长方体凸台，其左侧、右侧和前侧均贴有红绿色块构成的双色标识，其中左侧和右侧的色标排列方式相同。记标识中间水平颜色交界线相对于地面的高度为 h_m 。母机器人的摄像机置于回收舱入口的正上方，将其焦点 O_c 高度记为 h_c ，其光轴向下倾斜 ϕ 角指向入口正前方。

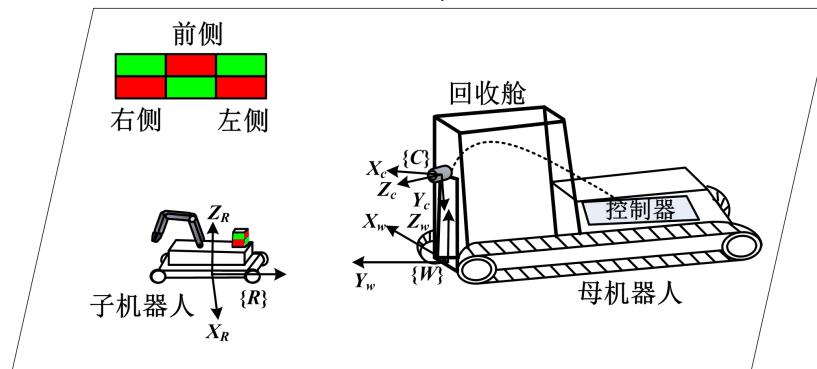


图 4-1 基于母机器人观测指引的子机器人回收

4.2.2 双色标识的识别

母机器人利用两种颜色块的交界关系识别子机器人的双色标识，其中包括两类交界方式：子机器人的左右侧均为上绿下红式（定义为 A 类交界），而其前侧为上红下绿式（定义为 B 类交界）。

为降低对光线强弱的敏感度，又避免需要大量浮点型运算的色彩空间转换，在图像处理过程中遍历原始的图像数据时，仅利用所采集像素点的 R 、 G 、 B 分量，采用加减、位移、比较及逻辑等适宜移动式处理器的计算方式对像素点进行宽松的颜色属性判别。

判别像素点为红色采用的判别式为 $(R > B + (B >> 1)) \&\& (R > G + (G >> 1))$ ，相应的约束式即为：

$$\begin{cases} R > 1.5G \\ R > 1.5B \end{cases} \quad (4-1)$$

相似地，绿色像素点的判别式为 $(R > B + (B >> 1)) \&\& (R > G + (G >> 1))$ ，其约束式：

$$\begin{cases} G > 1.5B \\ G > 1.5R \end{cases} \quad (4-2)$$

在像素宽松属性已知的基础上，图像特征提取通过连通生长方式一次图像遍历即可完成。如图 4-2 所示，对图像由左到右逐列扫描，寻找 A、B 两类交界点，在扫描到各类交界点的第一个点时，将其定义为所对应类别长度为 1 的颜色交界线段，在后续扫描中每得到一个新的交界点进行如下操作：

- 对比已生成的同类交界线段，判断其和已生成线段的右侧点是否邻近，合并或者记录为新生成的该类线段。
- 远离当前扫描列的非最长线段不再记录，最终获取两种排列方式各自对应的最长交界线段。考虑到环境噪音等情况，当 A 类最长的交界线段过短或者距 B 类线段过远时，其被剔除。

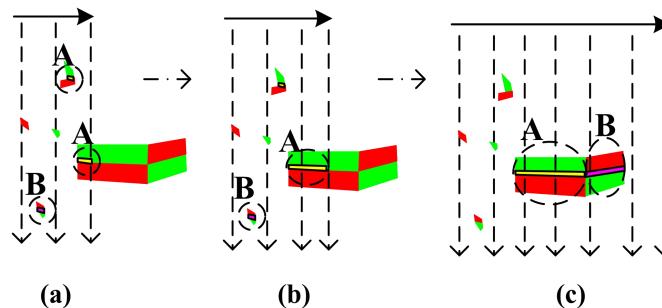


图 4-2 连通生长示意图。(a) 逐列扫描，寻找交界点形成 A、B 两类交界线段；(b) 找

到交界点后连通生长邻近相应交界线段，远离当前扫描列的非最长线段不再记录；

(c) 确定两类交界各自最长线段。

扫描结束后，得到两类交界线段的长度记为 l_a 、 l_b ，以及各自中点在图像坐标系中的横坐标 u_a 和 u_b ，分别对应着子机器人左右侧和前侧色标的长度和位置。根据单目视觉的特点，母机器人观测不可能同时感知到左侧色标和右侧色标。如果 $u_a < u_b$ ，即视野中 A 类交界出现在 B 类交界的左侧，说明母机器人识别到的是子机器人左侧色标和前侧色标；如果 $u_a > u_b$ ，则为右侧色标和前侧色标；如果只有 B 类线段，则说明子机器人的航向基本对准回收舱入口。

4.2.3 图像特征与入舱位姿关联

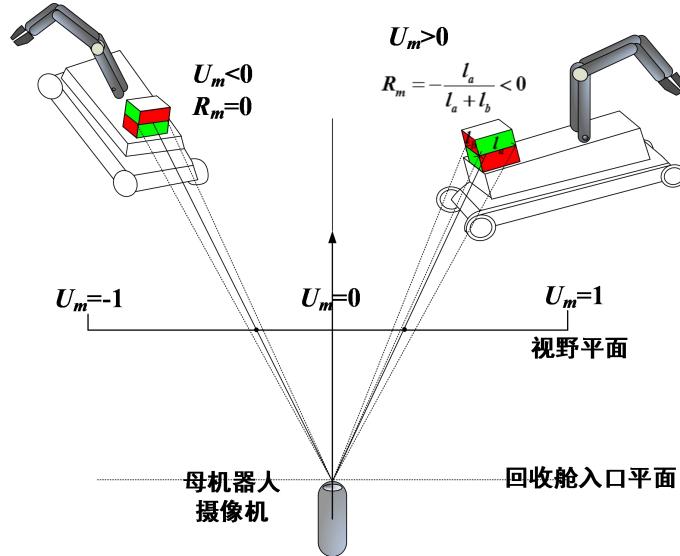
定义图像特征变量：子机器人在母机器人观测视野中的方位系数(简称视野方位系数) U_m 、左或右侧色标颜色边界线占色标整体观测长度的比例因子(简称边界比例因子) R_m 。基于上述图像处理的结果即两类交界线段的长度 l_a 、 l_b ，以及各自中点在图像坐标系中的横坐标 u_a 和 u_b ，图像特征变量的计算如下：

$$U_m = \begin{cases} \frac{(u_a + u_b) - w}{l_a + l_b} & (l_a > 0) \\ \frac{2u_b - w}{l_b} & (l_a = 0) \end{cases} \quad (4-3)$$

$$R_m = \text{Sgn}(u_b - u_a) \frac{l_a}{l_a + l_b}$$

其中， w 为图像的宽度。不难看出，图像特征变量 U_m 和 R_m 与子机器人相对入口的方位以及当前航向存在以下关联：

- 若 U_m 接近 0，则子机器人基本位于视野中央即入口的正前方，若 U_m 小于 0，说明子机器人当前接近母机器人观测视野的左侧，其值越负，子机器人越靠左；相似地，若 U_m 大于 0，则子机器人当前位于母机器人视野的右侧。
- 比例因子 $R_m=0$ 表示子机器人的航向正对摄像机即回收舱入口(见图 4-3)；若 $R_m < 0$ ，表明子机器人的前侧及左侧的双色色标被母机器人的视觉观测到，此时子机器人的航行方向偏向回收舱入口的左侧， R_m 越负，航向越往入口左侧偏斜；相似地， $R_m > 0$ 表明子机器人的航行方向偏向入口的右侧。
- 在 $R_m \in (-1, 1)$ 时，若子机器人逆时针旋转会导致 R_m 增大，顺时针旋转会导致 R_m 减小。

图 4-3 视野方位系数 U_m 和边界比例因子 R_m

4.3 基于母机器人观测的子机器人模糊指引回收

根据视野方位系数 U_m 、边界比例因子 R_m 与关键入舱位姿间的关联，子机器人入舱时可采用以下引导策略。

- 若当前视野方位系数 U_m 为负，则调节子机器人的角速度使其左侧色标出现在视野中（即边界比例因子 R_m 为正），目的是使子机器人的航向偏向母机器人摄像机的右侧。需要注意的是，若 U_m 值越负，则期望 R_m 的值越大，从而使子机器人尽快趋近视野中央即入口正前方，随着 U_m 值接近于 0，则期望 R_m 变小一些，让子机器人朝向入口趋近。
- 若当前 U_m 为正，则期望子机器人的右侧色标出现在视野中（ R_m 为负），类似的， U_m 值越大，则期望 R_m 应当越负，使子机器人尽快趋近视野中央，随着 U_m 的值接近于 0，则通过调节子机器人角速度使 R_m 接近 0；
- 在 U_m 基本为零时，保持边界比例因子 R_m 的值基本为零，使之对准入口进入舱中。

在得到上述非精确量化的图像特征-位姿关联以及相应的航向引导策略，可基于模糊控制理论，将定性化描述的策略设计为具有明确输入输出的控制算法。

4.3.1 模糊控制简介^{[149][150]}

模糊控制是一种以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的数字控制技术，通过模拟人类思维的模糊性，采用与人类语言相近的语言变量进行推理，

将由自然语言描述的未精确量化的控制经验转变为可以在数字计算机上运行的控制算法。Zadeh 教授于 1965 年通过《Fuzzy Set and Fuzzy Systems》、《Fuzzy Sets》和《Fuzzy Algorithm》等论著首次提出了“模糊集合”、“模糊算法”的概念。引入模糊集合，直接将人类的推理、判断和思维过程用简明的数学形式表达出来，奠定了模糊控制器的理论基础。目前，模糊控制理论已被广泛应用于人类生产、生活的诸多方面，模糊控制器也被大量集成于工业产品中。虽然模糊控制器是基于模糊集合论设计的，但其两端的输入输出值为数值化的精确量，因此它不仅实现普通数学模型的控制，还能通过模仿人自然语言的描述方式，使难以用数学模型描述的对象被数值化的计算机程序所控制。

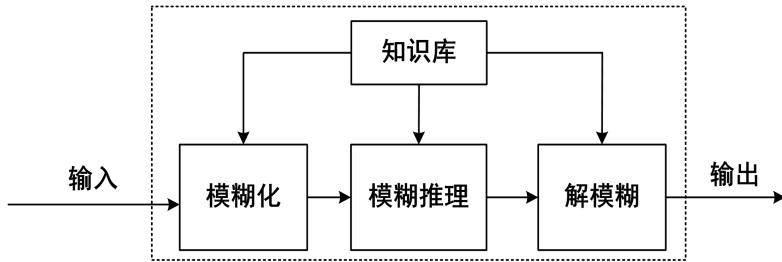


图 4-4 模糊控制器框图

图 4-4 示意了经典的 Mamdami 模糊控制模型，主要由模糊化、知识库、模糊推理和清晰化四部分组成^{[96][146]}：

1) 模糊化

模糊化的作用是将输入量由精确量转换成模糊化量，以便模糊推理的进行。其中输入量包括外界的参考输入、系统的输出或状态等。首先对进行输入量的尺度变换，使其变换到相应的论域范围，然后根据隶属度函数以对应的模糊集合来表示。模糊化一般通过模糊化运算实现，表示式为：

$$x = f_z(x_0) \quad (4-4)$$

其中， x_0 为输入的清晰量， x 为模糊集合， f_z 是模糊化运算符。单点模糊集合和三角模糊集合作为两种常用的模糊化方法常用于模糊控制中。

2) 知识库

知识库包含具体应用领域中的知识经验以及所要求的控制目标。它一般由模糊控制规则库和数据库两部分组成。数据库主要包括各语言变量的隶属函数、尺度变换因子以及模糊空间的分级数等；规则库则包含了用模糊语言变量表示的一系列控制规则，它们反映了控制专家的经验和知识，是模糊控制的基础。知识库和数据库须满足完备性原则，即对于任意的输入量，均能找到一个模糊集合，至少试用一条推理规则，从而保证任意输入均能给出合适的控制输出。

3) 模糊推理

模糊推理是模糊控制器的核心，它模拟人类以模糊概念为基础进行推理，以模糊规则使模糊化的控制量和模糊化的控制量相互对应，如果规则以简单因果形式及一一对应关系描述，那么它实质上就是模糊蕴含关系，只需要利用最小法或含积法进行蕴含运算即可输出以隶属度向量形式描述的模糊化控制量。而对于多输入单输出的推理规则，则需建立规则库，利用句子连接和关系合成进行推理过程，若规则无先后秩序之分，则规则的连接可表示为：

$$R = \text{also}(R_1, R_2, \dots, R_n) \quad (4-5)$$

其中， $R_i(i=1,2,\dots,n)$ 是第 i 条规则所表示单模糊蕴含关系， R 是 n 个模糊关系的组合， also 即连接词，实际控制中常采用求并运算，最终的合成计算形式如下，

$$z = (x \text{ and } y) \circ R \quad (4-6)$$

其中， x 和 y 是输入模糊量， z 是输出模糊量，而 and 是连接运算符，“ \circ ”是合成运算符。

4) 解模糊/清晰化

解模糊的作用是将模糊推理得到的模糊控制量变换为实际用于控制的清晰量。它包含将模糊的控制量经清晰化变成表示在论域范围的清晰量，以及将表示在论域范围的清晰量经尺度变换为实际的控制量。解模糊化运算可以表示为：

$$z_0 = df(z) \quad (4-7)$$

其中， z_0 为控制输出的清晰化量， df 为清晰化运算符。常用的解模糊化方法包括重心解模糊化方法、中心求和解模糊法和集合中心解模糊化。

在模糊控制中，控制规则的设计是设计模糊控制器的关键。模糊控制器控制规则的设计原则是：当误差较大时，控制量的变化应尽力使误差迅速减小；当误差较小时，除了消除误差，还要考虑系统的稳定性，防止系统产生不必要的超调甚至振荡。

4.3.2 控制框架

图 4-5 给出了基于母机器人观测的模糊指引控制框图。母机器人实时视觉观测子机器人位姿，产生视野方位系数 U_m 经 I 级模糊控制器调整后输出参考值 \bar{R}_m ，在此基础上，结合图像提取的边界比例因子 R_m ，经过 II 级 PD 控制器调整后输出用于修正子机器人入舱航向的角速度。

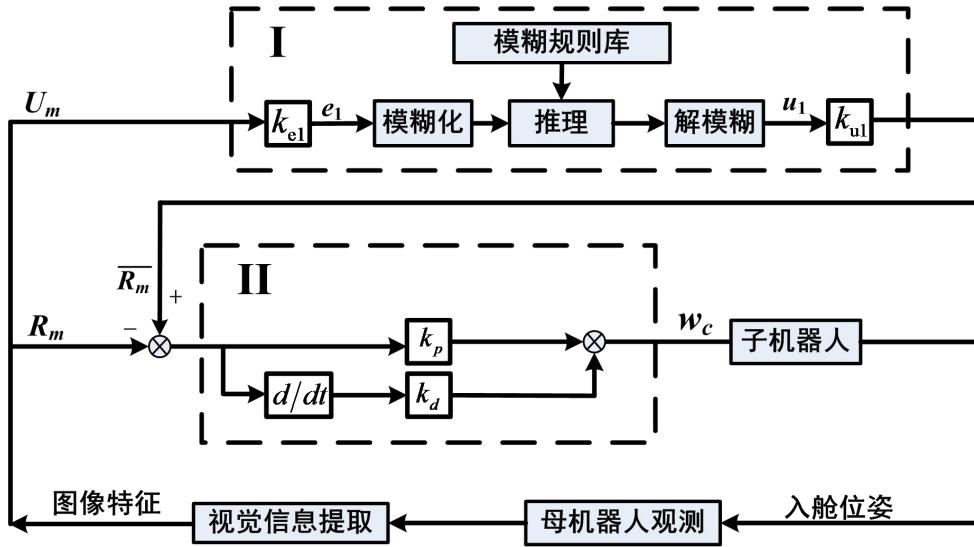


图 4-5 基于母机器人观测的模糊指引回收控制框图

1) I 级模糊控制器

k_{e1} 和 k_{u1} 分别为输入量 U_m 及输出量 R_m 的量化因子, 使模糊控制的直接参量和输出量 e_1 及 u_1 的论域量归一化至 $[-1, 1]$ 范围内, 由小至大对照 7 个语言值 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$, 即 {负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}, 相应的隶属度函数如图 4-6 所示。根据对图像特征和子机器人间位姿关联的分析, 可知在图像特征 U_m 和 R_m 接近于 0 时, 位姿含义相对明确, 因而所采用的隶属度函数收窄了语言值 Z 的隶属区间。基于前述航向引导策略所设计的模糊控制规则如表 4-1 所示。

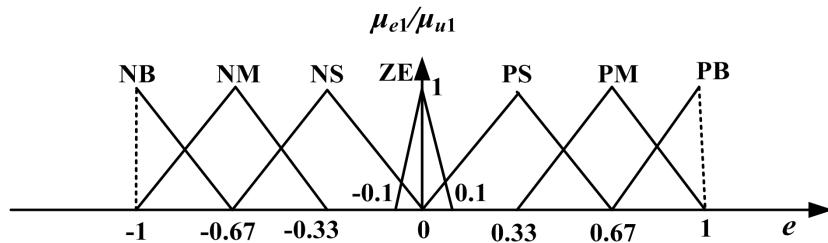


图 4-6 I 级模糊控制器所采用的隶属度函数

表 4-1 模糊控制规则表

E1	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
U1	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB

I 级模糊控制器采用一维规则, 单一条件形式进行推理:

R_i : 如果 e_1 是 $E1^i$, 则 u_1 是 $U1^i$ ($i \leq 7, j \leq 7$)。

采用单点模糊集合的模糊化方法，即以 e_1 的清晰值按照图 4-6 所示隶属度函数计算所激活语言值的隶属度 $\mu_{E1i}(e_1)$ ，它等于所激活规则 R_i 的适用度 α_i ，再查找规则 R_i 输出的模糊量对应的隶属度函数的极大值点 u_{ci} ，最后采用加权平均法即可求解模糊控制器输出的清晰化量^[149]：

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{Bi}(u_{ci}) = \alpha_i = \mu_{E1i}(e_1) \\ u_1 = \frac{\sum_{i=1}^7 \lambda_i(u_{ci}) u_{ci} \mu_{Bi}}{\sum_{i=1}^7 \lambda_i \mu(u_{ci})} \end{array} \right. \quad (4-8)$$

其中激活因子 λ_i 取值为 1 或 0 用以表示规则 R_i 是否被激活， $\mu_{Bi}(u_{ci})$ 即为规则 R_i 输出的最大隶属度值。

2) II 级 PD 控制器

PD 控制器以 I 级控制器的输出量 \bar{Rm} 为预设量，将当前提取的图像特征 R_m 作为反馈量，取二者的差值为误差，在求导前后分别同给定的比例系数 k_p 和微分系数 k_d 相乘，随后合成输出子机器人的角速度 w_c 。

3) 运动决策

在得到模糊控制器输出的角速度 w_c 后，根据两轮驱动式移动平台的运动学模型，输出左右驱动轮的速度控制量 v_{lo} 和 v_{ro} ：

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{lo} = V_{set} - w_c B / 2 \\ v_{ro} = V_{set} + w_c B / 2 \end{array} \right. \quad (4-9)$$

其中 V_{set} 为移动平台的预设线速度， B 为两轮之间的间距。

4.4 实验

为验证所提出的基于母机器人观测的子机器人模糊指引回收方法的合理性，在母机器人回收舱的升降平台上方安装了观测用摄像机，在轮式移动机械臂激光传感器的前侧和左右两侧上各安装标识，进行了实验验证，包括无干扰情况下的子机器人回收和有人为干扰的回收实验两种情形。

需要说明的是，在所用模糊控制器的隶属度函数、规则库以及解模糊方法确定的情况下，系统的性能除了受子机器人本身的动态特性、子机器人双色标识的尺寸、观测摄像机的内参数、安装高度、俯视角度等影响外，I 级控制器输入输出的量化因子的取值以及 II 级控制器的 P、D 系数也会产生影响。算法相关参数如下： $k_{el}=1$ ， $k_{u1}=0.6$ ， $k_P=0.2$ ， $k_d=0.05$ ， $V_{set}=5cm/s$ 。母机器人摄像机的参数： $(k_x, k_y, u_0, v_0)=(904.07,$

$(932.23, 569.08, 406.89)$, 安装高度 $h_c=20\text{cm}$, 俯视角度为 $\varphi=20^\circ$; 子机器人双色标识的安装高度为 8cm , 每一侧红绿标识的长度均为 6cm ; 母机器人决策周期约为 80ms 。

实验1子机器人入舱的视频截图如图4-7所示。子机器人由回收舱入口左侧出发, 在母机器人的指导下一边往入口趋近, 一边调整航向, 最终在入舱之前使其航向与入口的法向一致, 最终顺利进入回收舱的升降平台。图4-8为子机器人入舱过程中, 母机器人观测子机器人的双色标识所提取出的图像特征变化曲线, 可以看出随着子机器人入口左侧趋近正前方, 视野方位系数 U_m 逐步由 -0.5 向 0 趋近, 同时, 边界比例因子 R_m 也逐步接近 0 。在入舱的后期阶段, 子机器人的航向基本正对摄像机, 即与回收舱入口法向一致。图4-9给出了子机器人的入舱轨迹, 子机器人由 S_c 位置出发, 第一次抵达入口正前方时发生了一次轻微的超调, 偏到了入口的右侧, 随后纠正航向回到入口正前方最终以基本垂直于 X 轴的姿态进入回收舱的升降平台。

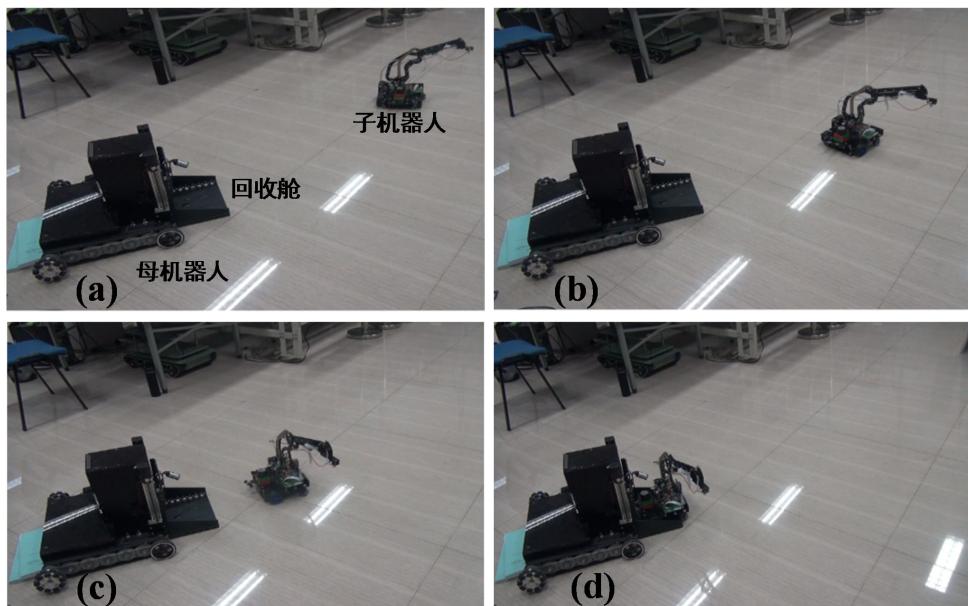


图4-7 实验1子机器人入舱视频截图

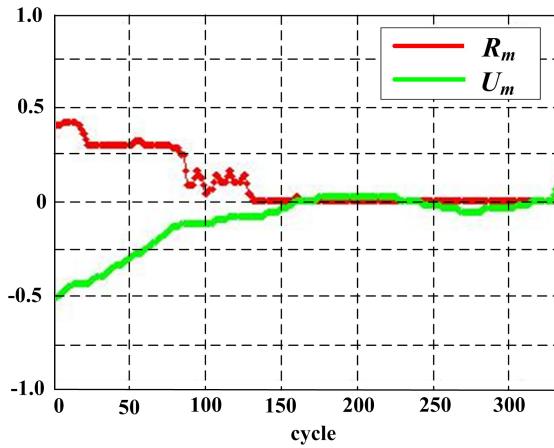
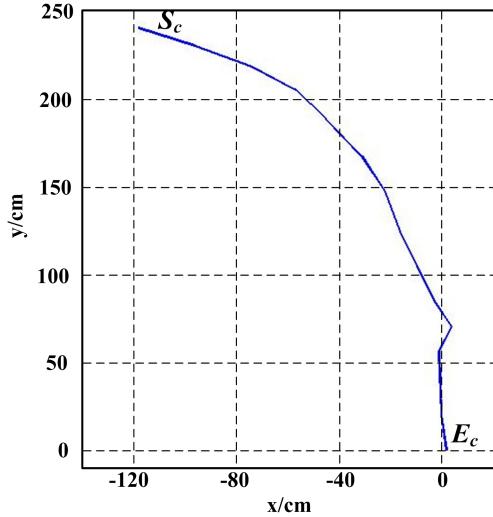
图 4-8 母机器人视觉观测到的图像特征 U_m 和 R_m 变化曲线

图 4-9 实验 1 子机器人入舱轨迹

实验 2 用于验证所提方法的抗干扰能力。实验视频截图如图 4-10 所示。子机器人首先由入口右侧出发，在其抵达入口正前方时施加人为的干扰，将其手动移至入口左侧前使其航向偏离入口（见图 4-10(c)-(d)），最终子母式机器人系统及时克服干扰，从入口左侧成功进入回收舱的升降平台。图 4-11 为母机器人观测到的图像特征，在人为干扰前图像特征均基本接近于 0，意味着子机器人保持直行姿态即可成功进入升降平台，人为介入干扰之后 R_m 的值变负，在母机器人的指导下，子机器人克服扰动使 R_m 的值由负变正，从而使航向偏向右侧，最终 U_m 再次在 0 周围， R_m 也回归到 0 附近。此时，子机器人具备了合理的入舱位姿，最终任务顺利完成。图 4-12 为人为介入干扰前后子机器人的入舱轨迹，首先子机器人由出发点 S_c 航行至 S_A 位置，随后被人为拖拽至 S_B 位置，借助母机器人的引导，最终子机器人抵达回收舱的升降平台。

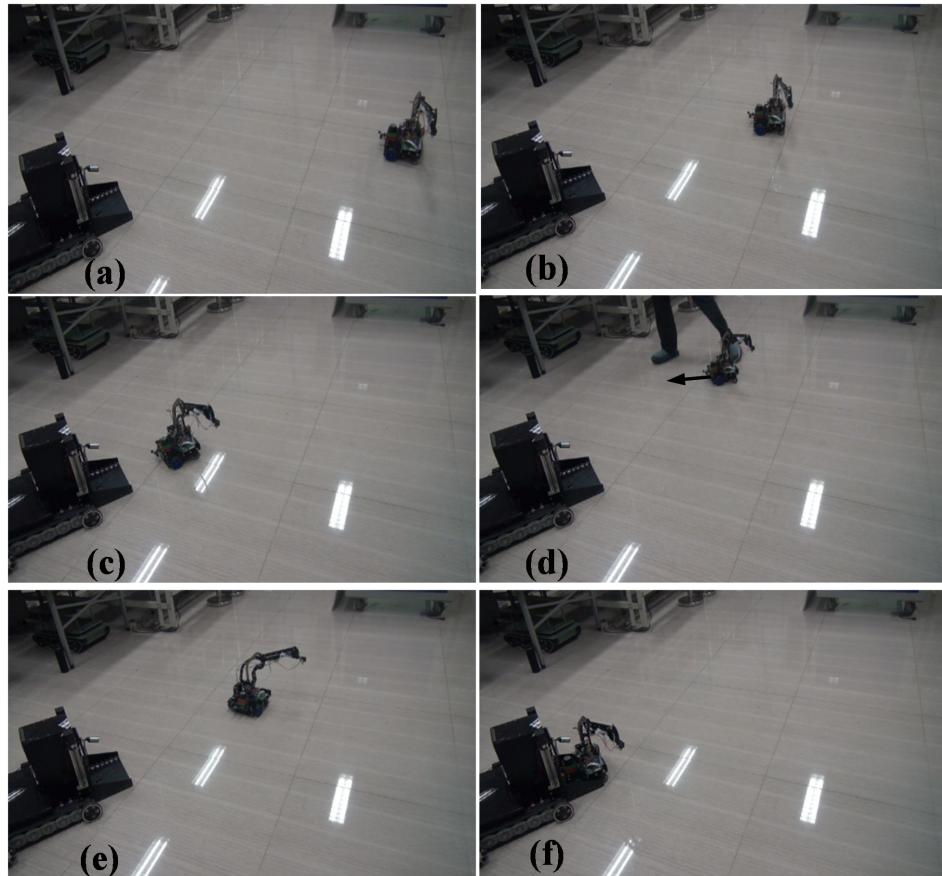


图 4-10 实验 2 子机器人入舱视频截图。(a)~(c)施加干扰前; (d)~(f)施加干扰后;

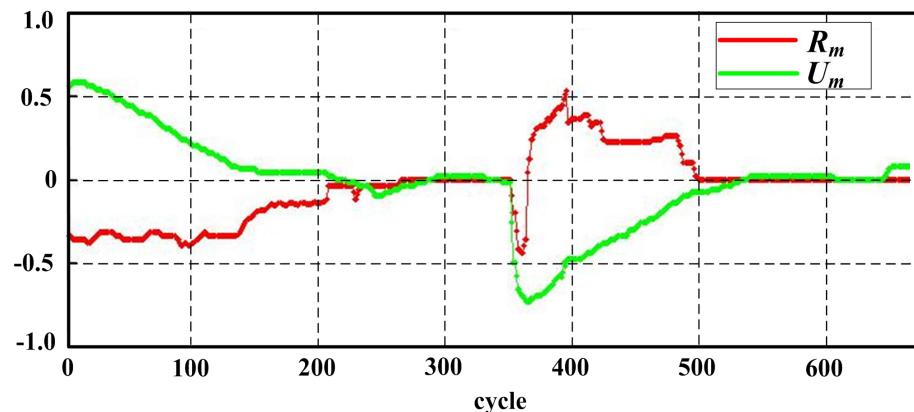


图 4-11 实验 2 图像特征 U_m 和 R_m 的变化曲线

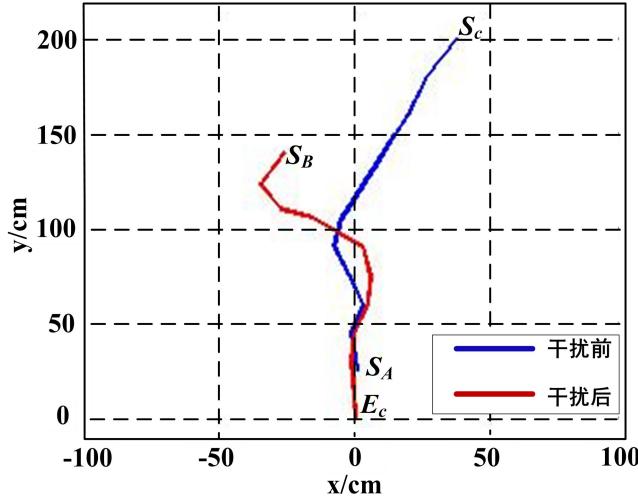


图 4-12 实验 2 子机器人的入舱轨迹

4.5 本章小结

为解决子机器人的回收问题，本章提出了一种基于母机器人观测的子机器人模糊指引回收方法，为子机器人设计了三面双色标识，通过分析图像特征与子机器人入舱位姿间的关联，给出了一种模糊性的入舱指引策略，而后基于模糊控制思想，设计了含模糊控制的二级控制器用于修正子机器人入舱航向，使子机器人在贴近回收舱时不仅位于入口正前方且航向基本垂直于入口从而能顺利入舱。最后，基于所设计的子母式系统平台进行了验证实验，实现了母机器人对轮式移动机械臂的回收，证明了所提方法的有效性和抗干扰能力。

第 5 章 基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法

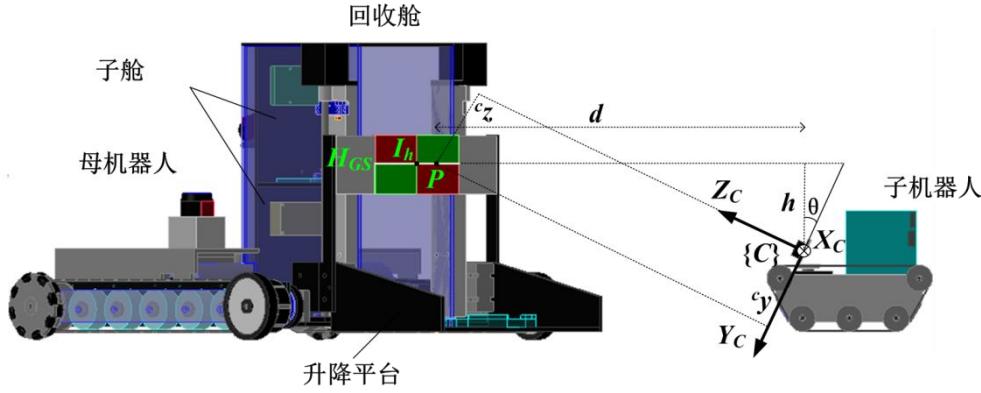
5.1 引言

第 4 章将视觉标识置于子机器人上，通过母机器人观测并指引其入舱的方式实现了子机器人的回收，而将引导标识置于母机器人回收舱入口处，利用子机器人所携带的摄像头获取信息进而实现入舱，是另一种子母式机器人系统常见的回收方式。然而子机器人运算能力有限，可能需要借助母机器人运算能力或第三方 PC 进行图像处理，甚至借助人工方式进行入舱位姿的修正，这些都需要子机器人对大量图像数据的实时连续的传输。采用有线传输方式需要配备缆线设备，子机器人活动纵深易受限制，若采用无线传输方式，要保证大量图像传输的实时性和连续性，实际应用中对通讯条件要求极高，可靠性差。为此，本章考虑充分利用子机器人有限的运算资源，开展嵌入式的图像处理，基于简明图像特征数据用于指导入舱行为，同时，还考虑利用子机器人和母机器人之间的协调配合，缩短回收时子机器人的入舱路程和时间消耗。

本章提出了一种基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法，首先分析引导标识中的局部特征不变区间，有针对性地设计了基于宽松颜色属性和最大环绕限制的快速识别算法，以适用于子机器人嵌入式平台处理的需要；对子机器人所捕获图像特征进行分析，着重研究引导标识水平颜色交界线在摄像头图像平面中成像斜率同子机器人偏航方向的关系，得出了成像斜率-视偏角模型，继而建立了子母协调式的回收任务模型使子机器人和母机器人在入舱过程中相互配合，纠正子机器人航向和回收舱入口的朝向，实现快速回收；另外给出了子机器人成功入舱所需的位姿条件，对入舱行为的控制精度进行了分析。

5.2 基于子机器人嵌入式视觉平台的图像处理

如图 5-1 所示，由四块红绿矩形色块构成的引导标识置于母机器人回收舱升降平台上，四块色块尺寸相同，红绿交错构成十字形颜色边界线，其纵向颜色边界线垂直于地面同子舱入口的垂直平分面重合，其水平颜色交界线记为 H_{GS} ，中点即引导标识的中心 I_h 。

图 5-1 子机器人摄像头坐标系 $\{C\}$

5.2.1 子机器人坐标系

为便于图像特征分析, 先建立子机器人的摄像头坐标系 $\{C\}$ 及其本体坐标系 $\{R\}$ 。如图 5-1 所示, 坐标系 $\{C\}$ 的原点即为子机器人摄像头焦点 O_C , Z_C 轴由焦点出发同摄像头的光轴重合。在 $\{C\}$ 任取一点 $P(c_x, c_y, c_z)$, 根据小孔模型其在子机器人图像平面上的坐标 (u, v) 为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x / c_z \\ c_y / c_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

若 P 点距 O_C 的水平距离为 d , 垂直方向高度差为 h , 则有:

$$\begin{cases} c_y = (d + h \tan \theta) \sin \theta - h \sec \theta \\ c_z = (d + h \tan \theta) \cos \theta \end{cases} \quad (5-2)$$

其中 θ 为子机器人摄像头的安装倾角, 是一个较小的正常数。

子机器人本体坐标系 $\{R\}$ 如图 5-2 所示, 其原点取 $\{C\}$ 的原点在地面上的投影点, Y_R 轴指向运动方向, X_R 轴与其垂直指向子机器人右侧, 点 P 在 $\{R\}$ 中的投影横坐标 r_x 同其在 $\{C\}$ 中的横坐标 c_x 相等, 纵坐标 c_x 等于水平距离 d 。

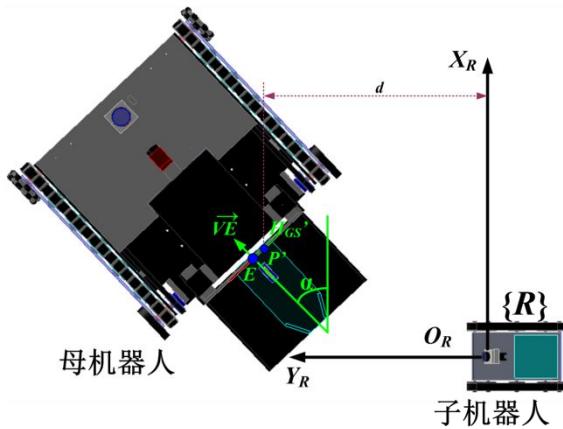


图 5-2 子机器人本体坐标系{R}

5.2.2 特征不变区间

引导标识主要根据引导标识中心 I_h 点周围的颜色环绕关系识别，而后由中心点向左右延伸，拟合出水平颜色交界线的成像直线。由于子机器人摄像头从不同方向采集图像时，两条十字交界线会发生不同程度的倾斜，传统方法需要设计多个方向的检测模板加以识别，然而子机器人能提供的运算资源极为有限，为解决该问题，本章首先估算出十字线的倾斜范围，进而针对特征稳定的角度区间即局部特征不变区间设计高效的算法。

将水平颜色交界线 H_{GS} 在 $\{R\}$ 的投影线段标记为 $H_{GS'}$ ，其法向量 $\vec{vE} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$ 亦为入舱法向量，其中 α ($\alpha \in (0, \pi)$) 为回收舱入口方向角(简称入舱角)，将 I_h 在 $\{R\}$ 中的投影位置标记为 $E(x_e, y_e)$ 。引导标识上任意一点，其在 $\{C\}$ 和 $\{R\}$ 中的横坐标为：

$${}^c x = {}^R x = x_e - (d - y_e) \tan \alpha \quad (5-3)$$

若子机器人捕捉到引导标识，法向量 \vec{vE} 同向量 $\vec{O_R E}$ 的夹角必定为锐角，于是有：

$$\overrightarrow{O_R E} \cdot \overrightarrow{vE} = x_e \cos \alpha + y_e \sin \alpha > 0 \quad (5-4)$$

在 H_{GS} 上任取两点 A、B 结合公式(5-1)、(5-2)和(5-3)计算成像坐标 (u_A, v_A) 、 (u_B, v_B) ，从而， H_{GS} 在子机器人图像平面中的成像斜率计算如下：

$$\overline{k_h} = \frac{v_A - v_B}{u_A - u_B} = \frac{-k_y h_g \cos \alpha}{k_x (x_e \cos \alpha + y_e \sin \alpha + h_g \tan \theta \sin \alpha) \cos \theta} \quad (5-5)$$

其中 h_g 为引导标识中心超过摄像头的高度。

分析式(5-5)的分母不难发现，由于入舱角 $\alpha \in (0^\circ, 180^\circ)$ ， $\sin \alpha$ 大于 0， θ 为一个较小的正值常数， $\cos \theta$ 的值接近 1，结合式(5-4)，可知分母代数值一定为正，且如果

子机器人的入舱法向距离大于 h_g 时(入舱法向距离即子机器人距引导标识所在平面的垂线长度, 而子机器人过于贴近, 引导标识将不可见, 因此如果图像被捕捉到, 入舱法向距离应大于 h_g), 意味着小于 1, 即水平直线的成像斜率在 $\pm 45^\circ$ 范围内。

相似地, 在引导标识竖直颜色边界线上任取两点 C 、 D , 可计算出竖直颜色边界线的理论上的成像斜率:

$$\bar{k}_v = \frac{v_C - v_D}{u_C - u_D} = \frac{k_y}{k_x(x_e/y_e)\sin\theta} \quad (5-6)$$

其中 x_e 、 y_e 为 C 、 D 在地面上的公共投影 E 的坐标(参照图 5-2 所示本体坐标系), 若引导标识出现在视野中, E 必定在摄像头的视场范围内使 $O_R E$ 同 Y_R 轴的夹角小于 CMOS 摄像头视场角的一半, 安装倾角 $\theta < 15^\circ$, 可知 $|k_v| > 1/(\tan 31.5^\circ \sin 15^\circ) \approx \tan 81^\circ$ (所用 CMOS 摄像头视场角为 63°), 则图像平面中竖直颜色边界线的成像直线的角度在 $90^\circ \pm 9^\circ$ 之间。

综上所述可知, 若子机器人识别到引导标识, 所获取图像中围绕引导标识中心的四个对称的角度区间 $45^\circ \sim 81^\circ$, $99^\circ \sim 135^\circ$, $-135^\circ \sim -99^\circ$ 以及 $-81^\circ \sim -45^\circ$, 颜色排布关系是确定的。

5.2.3 视觉信息提取

根据上述推导所确定的局部特征不变区间, 可取 $(45^\circ + 81^\circ)/2 = 63^\circ$ 方向设计中心点的识别算法, 其中 $\tan 63^\circ \approx 2$, 整个识别过程经过一次全局稀疏遍历和有限的局部完整遍历完成。首先从图像右下角分别以 3、6 个像素作为行、列的间隔进行稀疏扫描, 每找到一个绿色像素点 (i, j) , 采用如下方式获取相应的环绕点组: 依次检测像素点 $(i, j-12)$ 、 $(i+6, j-12)$ 和 $(i+6, j)$ 是否对应红、绿、红色, 当任意一点不能满足条件, 立刻跳转继续稀疏遍历, 若皆能满足对应关系, 将该点对记录为一个环绕点组 G_{ij} ; 紧接着在 (i, j) 邻域完整遍历搜索绿色点, 找到后按上述相同的方式检测颜色排布特征, 并将满足条件的四个点对加入环绕点组 G_{ij} 。若最大环绕点组 $\max G_{ij}$ 的像素点数量 N_G 大于给定阈值 T_N , 则认为引导标识被识别, $\max G_{ij}$ 为有效环绕点组, 计算其质心坐标作为引导标识的中心点 $I_h(u_h, v_h)$ 。

为适应嵌入式处理的特点, 设计程序时避免狭隘的颜色阈值标定, 以及需要大量的浮点型除法的色域空间换算, 仅以整型加、乘和比较运算处理初始 RGB 数据。例如判定某像素点为红色, 考虑利用宽松属性判别式:

$$(R-1) \times 100 > (105 \times G) \&& (R-1) \times 100 > (105 \times B)$$

结合宽松颜色属性判断和最大环绕点组限定, 保证了识别的鲁棒性和可靠性。

在得到有效的中心点 I_h 后, 以 I_h 为起点利用条形算子(见图 5-3(a))向两侧逐列扫描。以左侧为例, 条形算子长度为 11, 检测时仅检测上下端点是否为上红下绿, 当其上下端点同时满足要求, 将条形算子中心点所在位置记录为有效交界点。计算所在列有效交界点的平均值作为该列最终的交界点, 同时也作为下列搜索基准, 以加快速度获取左侧全部交界点。相似的, 向右侧扫描获取的右侧交界点。

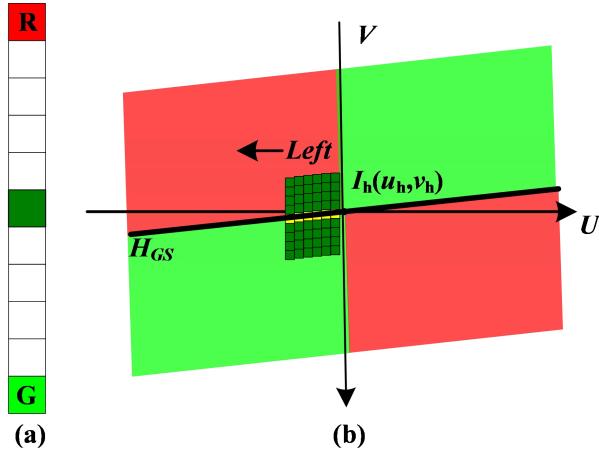


图 5-3 引导标识水平颜色交界线搜寻(以左侧为例)

得到这些交界点后, 计算两端交界点横坐标的差值 S_u 作为引导线段 H_{GS} 的水平成像长度, 根据式(5-7)以最小二乘法处理这些交界点坐标, 可得水平颜色交界线 H_{GS} 在子机器人视野中对应的成像斜率 k_h 。

$$k_h = \frac{\sum_{i=1}^{S_u} (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^{S_u} (u_i - \bar{u})^2} \quad (5-7)$$

其中 \bar{u} 和 \bar{v} 分别为所有交界点的横、纵坐标的均值。

最终, 引导标识的中心点横坐标 u_h 、成像斜率 k_h 、水平成像长度 S_u 作为视觉信息处理后的结果被输出。

图 5-4 给出了一幅子机器人图像处理的实例, 所显示图片为子机器人利用 CMOS 摄像头获取的引导标识图像。图中的圆圈标记的是按照局部特征不变区间所提取出的环绕点组, 其中黑色圆圈标记的环绕点组的有效像素最多, 因而被选为最终得环绕点组, 计算其质心即引导标识的中心 $I_h(u_h, v_h)$, H_{GS} 的成像直线段被标记为黄色线段; 所得视觉信息处理的结果为 $u_h=293$, $S_u=39$, $k_h=-0.0762$ 。



图 5-4 子机器人图像处理实例

5.2.4 成像斜率-入舱角模型

当子机器人正对回收舱的入口时，引导标识的中心点横坐标 u_h 接近子机器人图像平面的竖直平分线，水平成像长度 s_u 的值会随着子机器人趋近入口而增加。为分析成像斜率 k_h 所蕴含的位姿意义，综合成像斜率理论值 \bar{k}_h （见式(5-5))及相关限制条件，得成像斜率-入舱角模型：

$$\begin{cases} 0 < \theta < 180^\circ, 0 < \theta < 15^\circ, \cos \theta > 0.96 \\ x_e \cos \alpha + y_e \sin \alpha > 0 \\ k_{xy} \approx 0, k_x \approx k_y >> k_{xy} \\ \bar{k}_h = \frac{-k_y h_g \cos \alpha}{k_x (x_e \cos \alpha + y_e \sin \alpha + h_g \tan \theta \sin \alpha) \cos \theta} \end{cases} \quad (5-8)$$

由上式可衍生出以下三条结论：

结论 5-1：若回收舱入口法向量 \vec{NE} ($\cos \alpha, \sin \alpha$) 同子机器人的航行方向一致，即入舱角 $\alpha=90^\circ$ 时，成像斜率为 0，也就是说此刻水平颜色交界线 H_{GS} 在子机器人图像平面的成像直线段也是水平的；若 $\alpha<90^\circ$ ，则 k_h 为负；若 $\alpha>90^\circ$ ，则 k_h 为正。

结论 5-2：若子机器人的摄像头指向引导标识的中心点，则成像斜率的绝对值 $|\bar{k}_h|$ 在理论上同回收入口角相对于子机器人的航向的偏差角 $|90^\circ - \alpha|$ 呈正相关，同子母机器人间的相对距离呈负相关性。进一步的，如果成像斜率 k_h 和水平颜色交界线成像长度 s_u 满足邻域特征集合 $\{|k_h| \geq |^i k_h| \cap s_u \geq ^i s_u | (^i k_h, ^i s_u) \in f_{list}, i=1, 2, \dots\}$ ，则可以断定子机器人位于回收舱入口的邻域内，其中 f_{list} 为将子机器人按所设定领域上限距离对准引导标识，在围绕入口不同位置上采集图像并基于嵌入式系统处理得到的一组视觉信息数据 (k_h, u_h) 。

结论 5-3: 在子机器人距离回收舱较近, 且航向对准入口并且和回收舱入口法向一致时, 子机器人的嵌入式视觉系统所提取视觉信息应满足:

$$\begin{cases} k_h \in (-\Delta k, \Delta k) \\ u_h \in (\frac{W}{2} - \Delta u, \frac{W}{2} + \Delta u) \\ s_u \geq s_u^e \end{cases} \quad (5-9)$$

其中 W 为子机器人摄像头的图像宽度, Δu 和 Δk 是分别针对视觉信息 u_h 和 k_h 设计的控制裕量, s_u^e 为将子机器人正对入口以给定标准距离 d_e 所测量的水平成像长度 s_u 基准值。若式(5-9)得以满足, 子机器人即可直行登上回收舱升降平台, 最终完成入舱任务。

5.3 子母协调式回收方法

子机器人和母机器人基于子机器人视觉平台所提取出的图像处理结果(u_h, k_h, s_u), 结合成像斜率-入舱角模型中关于视觉信息和入舱位姿的相关结论, 进行协调决策, 其中子机器人分步骤向母机器人趋近, 母机器人则通过自身调整, 使回收舱入口的法向同子机器人的航向一致(使 $\alpha=90^\circ$)。

5.3.1 协调式入舱策略

如图 5-4 所示, 在母机器人进入子机器人的视距范围之后, 子母协调式入舱策略可分四个阶段进行: 首先(见图 5-5(a)), 子机器人和母机器人按不同角速度自转, 以保证引导标识能出现在子机器人的视场角范围内从而被识别。随后(见图 5-5(b)), 子机器人在视觉信息 u_h 引导下对准引导标识趋近入口, 直到抵达回收舱的邻域范围内, 即发现嵌入式平台所提取的视觉信息属于**结论 5-2** 中给出的领域特征集合。在趋近过程中, 母机器人基于**结论 5-1** 根据所提取 k_h 的代数符号原地旋转以修正入口法向。在第三阶段(见图 5-5(c)), 母机器人仍然依据 k_h 的代数符号但以较低的转速调整入口法向, 子机器人原地旋转或缓慢前进直到发现所提取的视觉信息满足**结论 5-3** 给出的式(5-9)。在最后阶段, 子机器人直行登上回收舱升降平台并接收母机器人的调度指令配合升降平台动作进入指定子舱(见图 5-5(d))。需要指出的是, 在第二和第三阶段若子机器人发现连续几帧图像均不能提取出有效视觉信息则再次原地旋转以便于再次识别出引导标识。

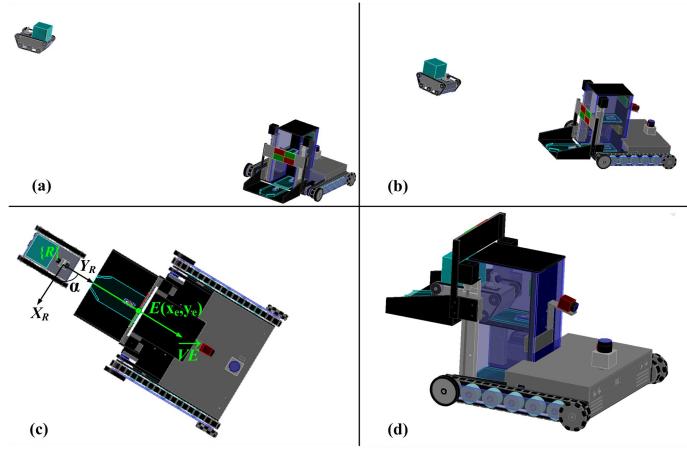


图 5-5 子母协调式回收策略示意图: (a)子母机器人不等速旋转使引导标识可视; (b)子机器人趋近的同时母机器人调整入口法向; (c)协作微调相对位姿直到满足入舱条件; (d)子机器人配合升降平台进入子舱

5.3.2 入舱任务建模

根据上述协调式入舱策略对子母机器人进行入舱任务建模, 其中子机器人的任务状态有 *linking*、*approaching*、*matching* 和 *directed* 四种; 母机器人则具有三种任务状态: *linking*、*aligning* 及 *directing*, 各状态间的关联关系见图 5-6, 其中 $C_1 \sim C_4$ 为任务状态转换条件, 具体含义如下:

- C_1 : 子机器人已捕捉到引导标识;
- C_2 : 子机器人进入回收舱邻域范围;
- C_3 : 所提取视觉信息满足式(5-9);
- C_4 : 子机器人在连续几帧图像中均不能提取出有效的视觉信息。

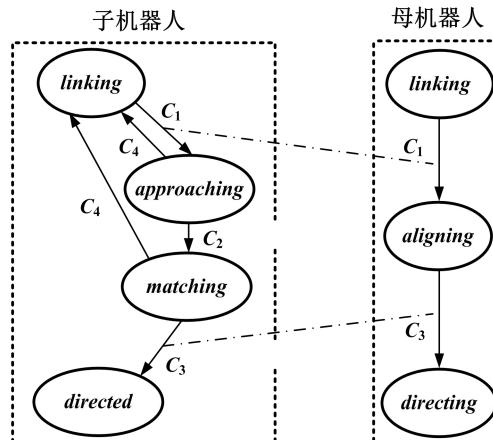


图 5-6 入舱任务状态模型

在 *linking* 状态中子机器人和母机器人都原地自转，当条件 C_1 满足，子机器人进入 *approaching* 状态，而母机器人进入 *aligning* 状态；待条件 C_2 满足后，子机器人进入 *matching* 状态缓慢调整位姿，母机器人依然处于 *aligning* 调整回收舱入口的法向直到条件 C_3 满足，而后，子母机器人分别进入 *directed* 和 *directing* 状态通过相互配合完成任务。对于子机器人来说，当其处于 *approaching* 和 *matching* 状态，如果条件 C_4 满足，则返回初始 *linking* 状态。子母协调入舱任务模型的流程框图如图 5-7 所示。

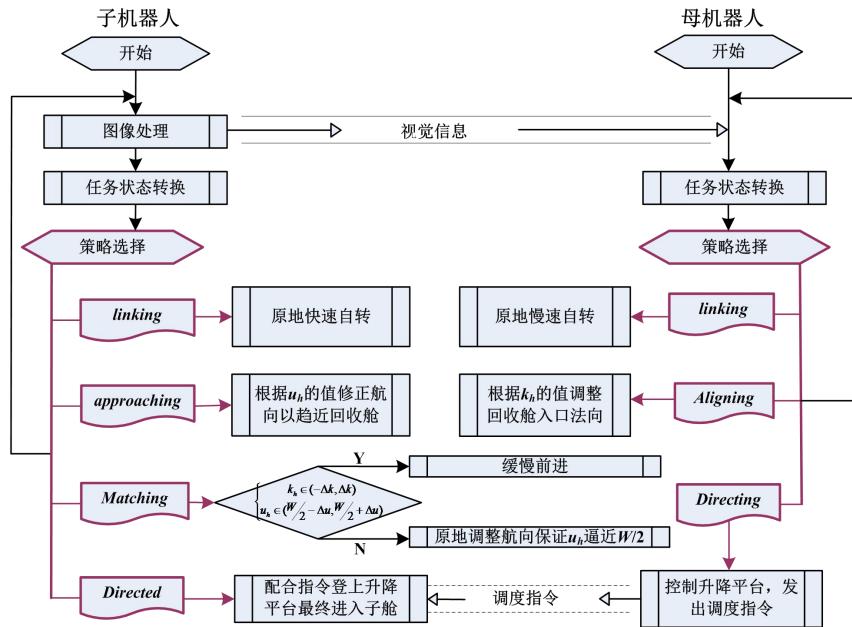


图 5-7 子母协调执行入舱任务模型的流程框图

5.3.3 针对固定回收舱的子机器人位姿调整

特殊情况下，子机器人可能需要自主进入固定的回收舱，例如返回载有充电装置的固定回收舱进行充电等。此时，回收舱由于位置固定不变，无法利用子机器人所提取的视觉信息 k_h 去调整入口法向，这就需要子机器人进入入口邻域之后采用策略自我调整位姿，抵达入口正前方并修正入舱位姿直至进入回收舱中。该情形下的位姿调整策略可由子机器人利用摄像头转向舵机完成。如图 5-8(a)所示，子机器人首先对准引导标识进入回收舱邻域，随后利用摄像头转向舵机使摄像头的朝向垂直于本体，同时本体旋转在引导标识可见的基础上调整航向，后逐步修正航向使 $k_h \approx 0$ 从而使子机器人航向基本平行于入口平面，继而在入口前方左右平移最终使 $u_h \approx W/2$ 而停止在入口正前方；接下来，子机器人再次利用摄像头转向舵机调整摄像头朝向

使其同其本体的朝向一致，同时本体原地转动使 $u_h \approx W/2$ ，从而使子机器人基本位于正前方且航向指向入口，若此刻发现 k_h 同 0 有较大差值不能满足式(5-9)中的限制条件，则说明子机器人位姿仍有一定偏斜需要进一步修正。具体位姿修正如 5-8(b)所示，首先原地旋转从而使尾部退行方向偏向入口正前方，后退一定距离后再次旋转使 $u_h \approx W/2$ 以对准入口，再次检验 k_h 与 0 的偏差，根据检验结果决定是否趋近入口还是继续后退进行修正航向，如此反复修正位姿直至满足式(5-9)为止。

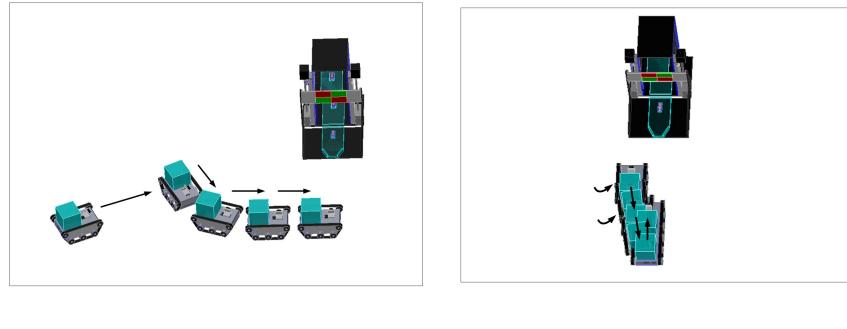


图 5-8 针对固定回收舱的子机器人位姿调整。(a) 抵达入口正前方;
(b) 修正入舱航向

5.4 子机器人入舱精度

5.4.1 成功入舱位姿精度要求

子机器人成功入舱对位置和航向均有一定的精度要求，如图 5-9 所示，以子机器人的本体坐标系 $\{R\}$ 去描述入舱的位置和航向误差，在入舱最后阶段子机器人直接直行进入回收舱：在直行起始时刻，中心点 I_h 在 $\{R\}$ 中的投影点 E 的横坐标 Δx_e 即为最后的入舱位置误差，入口法向相对于子机航向即 Y_R 轴的夹角 $\Delta\alpha$ 为入舱航向误差。入舱成功的条件是位置误差 Δx_e 和航向误差 $\Delta\alpha$ 必须满足：

$$\frac{b_e \cos|\Delta\alpha|}{2} > |\Delta x_e| + \frac{b_c}{2} \quad (5-10)$$

其中 b_e 和 b_c 分别是回收舱子舱的入口宽度和子机器人宽度；另外为便于下一步的精度分析，将在入舱最后阶段起始时刻，位置向量 $\overrightarrow{O_R E}$ 相对于 Y_R 轴的夹角记为对准误差 $\Delta\epsilon$ 。

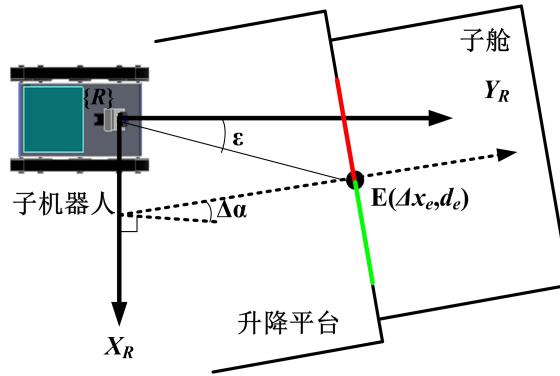


图 5-9 基于子机器人本体坐标系 $\{R\}$ 描述的入舱置偏差 Δx_e 和入舱航向误差 $\Delta\alpha$

5.4.2 误差估算

最后的入舱位姿精度主要受三方面的因素影响，包括控制裕量 Δu 与 Δk (即基于视觉伺服进行位姿调整为相关视觉信息值设定的目标裕量)，子机器人摄像头的光轴偏差 $\Delta\delta$ ，以及视觉信息提取偏差(即受图像处理算法影响导致图像特征处理值与理论值之间的偏差)，其中 Δu 与 Δk 人为给定， $\Delta\delta$ 是摄像头的性能参数。根据 5.2.3 节描述的图像处理细节， u_h 是子机器人所捕获图像中 I_h 周围若干环绕像素点的横坐标均值，这些像素点每 4 个像素点构成一个小组，每个 4 像素小组的坐标均值分布在以 I_h 为中心的 12 像素×6 像素范围内，以二维均匀分布律估算每个小组横坐标偏移方差有：

$$D_{uf} = \frac{1}{64} \int_0^{12} \int_0^6 (u - 3)^2 du dv \quad (5-11)$$

另外只有在环绕点组的像素总数大于给定阈值 T_N 时才认为所提取的视觉信息 u_h 有效，其标准方差 E_u 上限可估算为：

$$E_u \leq \sqrt{D_{uf} / (T_N / 4)} \quad (5-12)$$

取三倍标准方差为视觉信息 u_h 的偏差上限 1，先利用图 5-10 所示的摄像头视场角尺寸几何关系模型来计算对准误差 $\Delta\varepsilon$ 。

$$|\Delta\varepsilon| \leq \arctan \left(\frac{3E_u + \Delta u}{\sqrt{H^2 + W^2} / 2} * \tan(\theta_f / 2) + \tan(\Delta\delta) \right) \quad (5-13)$$

其中 W 和 H 分别为摄像头图像尺寸的宽度和高度， θ_f 是摄像头的视场角。

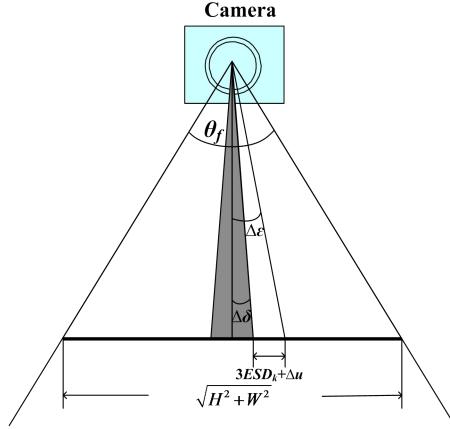


图 5-10 摄像头视场角尺寸几何关系模型

进而，估算入舱位置误差 Δx_e 上限：

$$|\Delta x_e| < d_e \left(\frac{3E_u + \Delta u}{\sqrt{H^2 + W^2} / 2} \times \tan(\theta_f / 2) + \tan(\Delta \delta) \right) \quad (5-14)$$

另一方面，视觉信息 k_h 是利用最小二乘法所拟合的成像直线段斜率产生的。在入舱最后直行阶段起始时刻成像直线段的长度不小于预定值 s_u^e ，直线段上每个点的像素纵坐标 v_i 利用 ± 5 的条形算子计算，其方差可估算为

$$D_{vi} = \frac{1}{10} \int_{-5}^5 v^2 dv \quad (5-15)$$

因此 k_h 的标准方差 E_k 估算如式(5-16)所示。

$$E_k = \sqrt{D \left(\frac{\sum_{i=0}^{s_u} (i - s_u / 2)(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=0}^{s_u} (i - s_u / 2)^2} \right)} \approx \sqrt{\frac{D_{vi}}{\sum_{i=1}^{s_u^e} (i - s_u^e / 2)^2}} \quad (5-16)$$

取三倍标准方差为视觉信息 k_h 提取误差的上限，联立式(5-8)、(5-9)和(5-16)完成入舱方向误差 $\Delta \alpha$ 的上限估算。

$$|\Delta \alpha| < \arctan \left| \frac{d_e + h_g \tan \theta}{h \sec \theta / (3 \sqrt{D_{vi} / \sum_{i=1}^{s_u^e} (i - s_u^e / 2)^2} + \Delta k) - |\Delta x_e|} \right| \quad (5-17)$$

5.5 实验

5.5.1 实验平台与入舱位姿精度估算

利用第二章所设计的母机器人对履带型视觉子机器人进行回收实验，使子机器人进入回收舱的双层子舱中，引导标识如图 5-11 所示，子机器人最终入舱位姿误差相关的参数如表 5-1 所示。



图 5-11 基于自主视觉伺服的子机器人回收实验

表 5-1 同入舱位姿误差相关参数

参数	数值	参数	数值
b_e	19cm	$\Delta\delta$	<1.5°
b_c	17cm	T_N	36
θ	15°	Δu	0.2s
h_g	23cm	Δk	0.02
W×H	640×480	d_e	22cm
θ_f	61°	s_u^e	203

首先依据式(5-11)和(5-15)计算方差 Du_f 及成像直线上像素点的纵坐标方差 Dv_i ，将计算结果结合表 5-1 中 T_N 和 s_u^e 的值代入式(5-12)和(5-16)，估算视觉信息 u_h 和 k_h 的标准差得 $E_u \leq 0.8165$ 以及 $E_k \approx 0.0014$ 。在此基础上利用式(5-14)和(5-17)估算出入舱位置误差 $|\Delta x_e| < 0.817\text{cm}$ ，入舱方向误差 $|\Delta \alpha| < 0.96^\circ$ ，式(5-10)右侧 $b_e \cos |\Delta \alpha| / 2 > 9.498$ ，左侧 $|\Delta x_e| + b_c / 2 < 9.317$ ，不等式成立，意味着子机器人理论入舱位姿精度满足了准确回收的要求。

5.5.2 实验结果

实验 1 为无干扰情况下，基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收实验。实验视频截图如图 5-12 所示，子母机器人首先通过原地旋转使子机器人的嵌入式视觉平台得以捕捉引导标识(见图 5-12(a)-(b))，随后子机器人向回收舱入口趋近(见图 5-12(c))，待贴近其升降平台之后，子母协作微调相对位姿，最终子机航向和回收舱入口法向一致(见图 5-12(d))，随后子机登上上升降平台并直行进入第一层子舱从而完成回收，如图 5-12(e)-(f)所示。

图 5-13(a)给出了子机器人的入舱轨迹，其中坐标系的原点建立在回收舱入口处，子机器人初始位置处于 S_c 点，其初始航向背向母机器人；最终回收舱入口朝向通过调整同子机器人航向相吻合，子机器人进而直行进入回收舱内。图 5-13(b)则显示了入舱过程中子机器人嵌入式视觉平台所提取相关引导标识的视觉信息，其中 s^* 和 u^* 分别表示引导标识水平成像长度 s_u 及中心点横坐标 u_h 除以图像宽度 W 后的归一化值，横坐标对应子机器人视觉的处理周期(约 130ms/cycle)。可以看出在起始阶段，子机器人未能捕捉到相关引导标识的视觉信息，此时子母机器人均处于 *linking* 状态。待视觉信息被捕捉到以后， u^* 向 0.5 调整，经过一次超调之后保持在 0.5 附近，表明此时引导标识基本位于子机器人的视野中央。 s^* 的值则随着子机器人向引导标识趋近而增加。成像斜率 k_h 为核心视觉信息，在早期阶段子母机器间距大使得所捕获引导标识的图像很小，用以拟合 k_h 的有效像素点不足导致其值有较大波动；随着 s^* 增加 k_h 的值波动性减小，最后稳定在 0 附近，这意味着子机器人的航行方向已经同回收舱的入口法向相一致，最后阶段子机器人直行进入回收舱，可以看出 u^* 和 k_h 分别保持在 0.5 和 0 附近， s^* 的值则上扬直到子机器人逼近子舱无法捕捉引导标识。

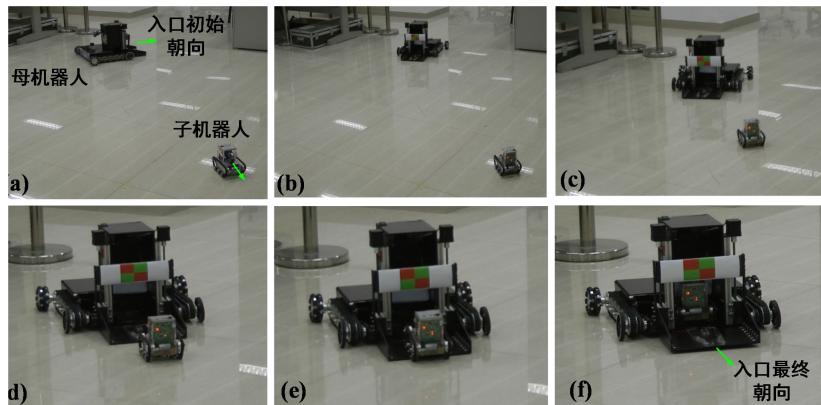


图 5-12 实验 1 视频截图。(a)-(b)子母原地旋转以捕捉引导标识；(c)-(d)子机器人趋近入口，母机器人调整入口朝向。(e)-(f)进入回收舱

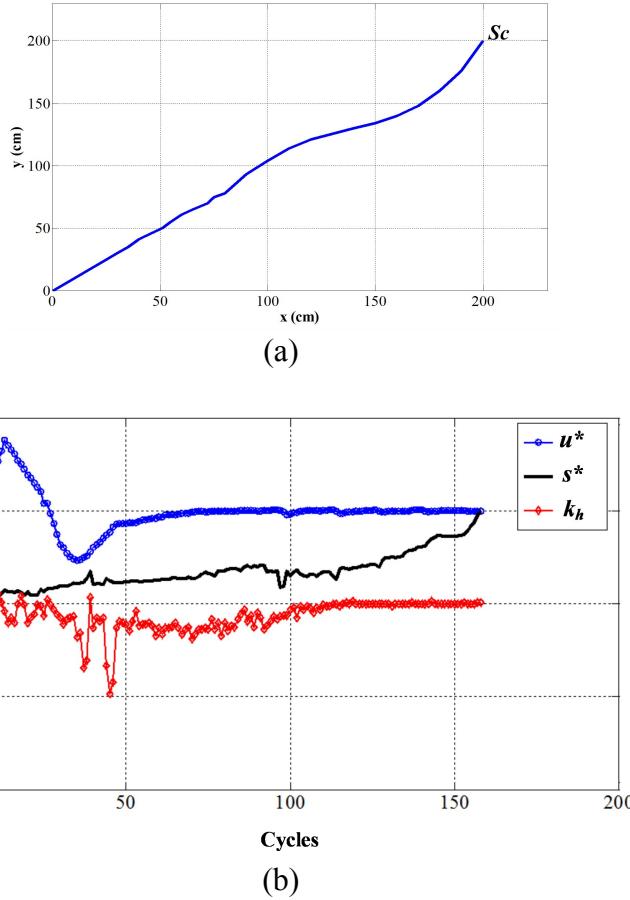


图 5-13 实验 1 的实验结果。 (a) 子机入舱轨迹; (b) 所提取的引导标识的视觉信息

实验 2 为干扰情况下，基于子母协调的子机器人回收实验。图 5-14 和图 5-15 分别给出了干扰情况下子机器人回收实验视频截图，子机器人的入舱轨迹以及所提取的视觉信息变化曲线。如图 5-15(a)所示，子机器人由点 Sc 出发，朝向处于原点位置的回收舱趋近，中途抵达位置 A 后被人为拖动至 B 点(参见图 5-14(b)-(c))，并特意使其背向引导标识从而捕捉不到有用视觉信息。整个过程的子机器人和母机器人的任务状态变化曲线如图 5-16 所示，其中 $c_state=1, 2, 3, 4$ 分别对应子机器人的 *linking*、*approaching*、*matching* 和 *directed* 状态； $m_state=1, 2, 3$ 分别对应母机器人的 *linking*、*aligning* 及 *directing* 状态。子机器人在 *approaching* 状态时受到干扰，进入了 *linking* 重新去搜索引导标识，再次恢复到 *approaching* 状态，图 5-15(b)也指出了子机器人丢失视觉信息一段时间后再次捕捉到了视觉信息。而后，在这些信息的指引下子机器人相继经历 *approaching*、*matching* 和 *directed* 状态最终顺利完成任务。

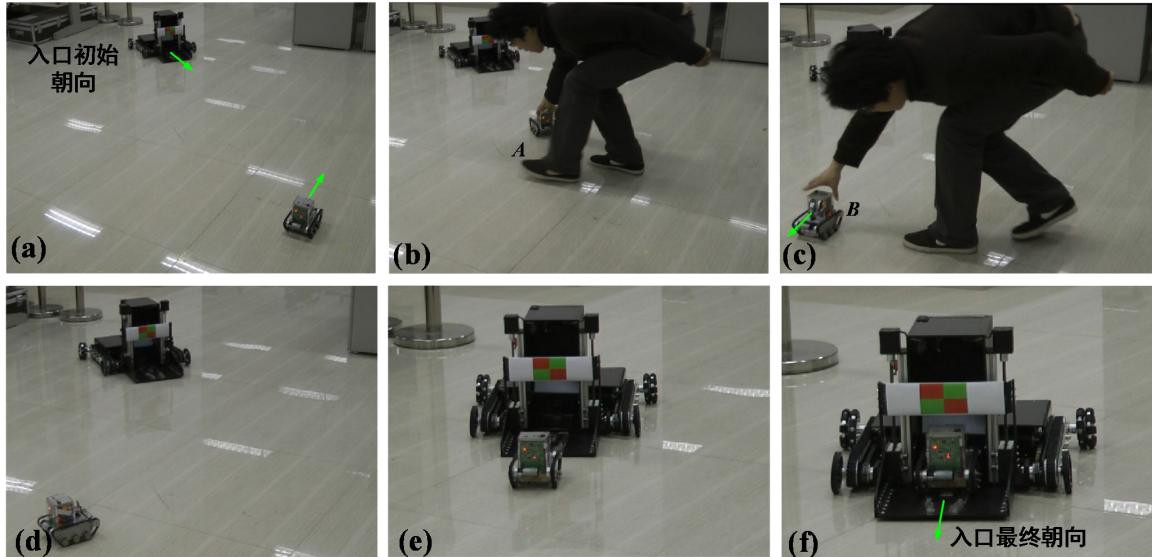


图 5-14 受到人为干扰的子机器人回收实验。(a)~(c)干扰前; (d)~(f)干扰后

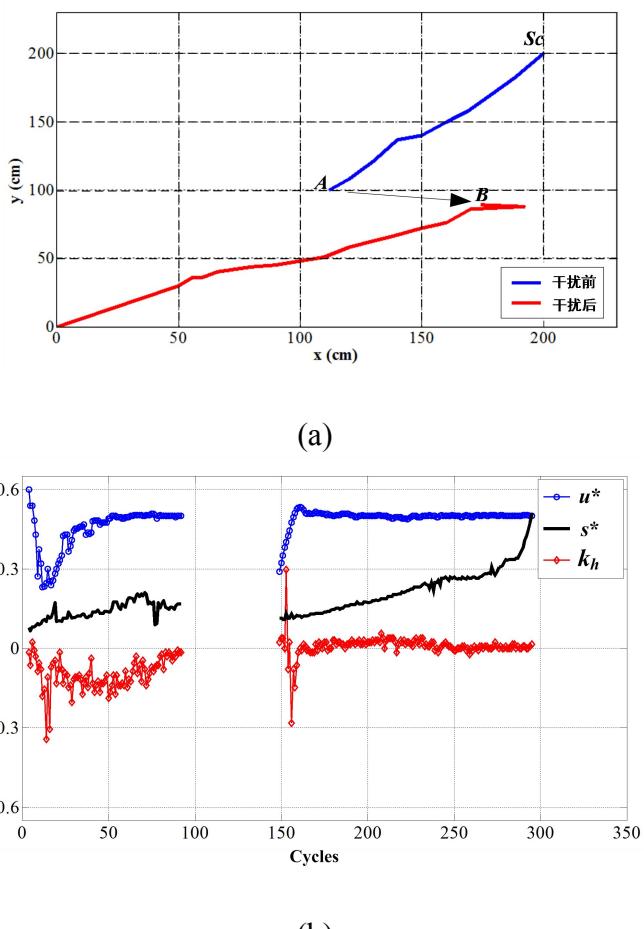


图 5-15 实验 2 的实验结果。(a) 子机入舱轨迹; (b) 所提取的引导标识的视觉信息

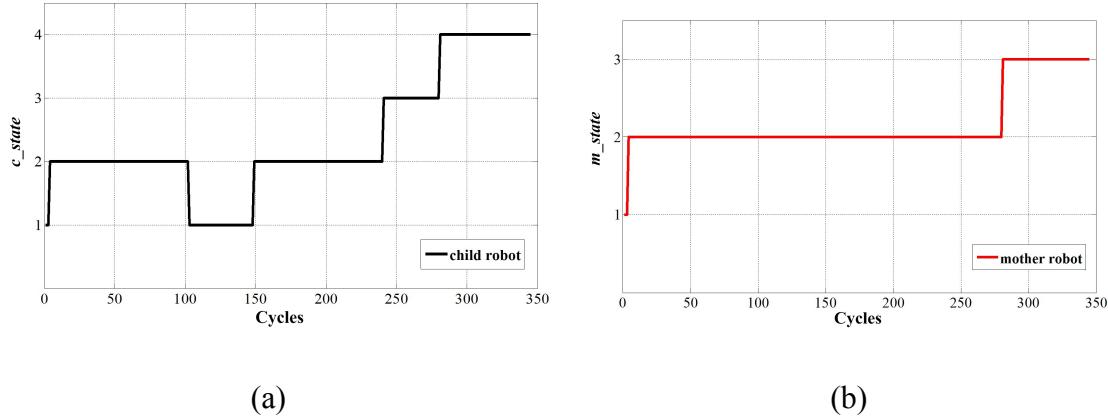


图 5-16 实验 2 任务状态变化曲线。(a) 子机器人任务状态; (b) 母机器人任务状态

实验 3 考虑固定回收舱情形下两个子机器人的入舱, 母机器人在整个过程中保持固定不动, 两个履带型视觉子机器人依次由左右两侧入舱。首先位于左侧的子机器人 1 通过原地旋转捕捉到引导标识, 随后趋近入口(参见图 5-17(a)-(b)), 继而根据 5.3.3 节所给出的位姿调整策略, 利用摄像头转向舵机使自身的航向平行于入口抵达入口正前方(见图 5-17(c)), 接下来再次调整使自身航向正对入口直行登上升降平台并进入第一层子舱中(见图 5-17(d)-(e))。相似地, 右侧的子机器人 2 进入第二层子舱中(见图 5-17(f)-(i))。

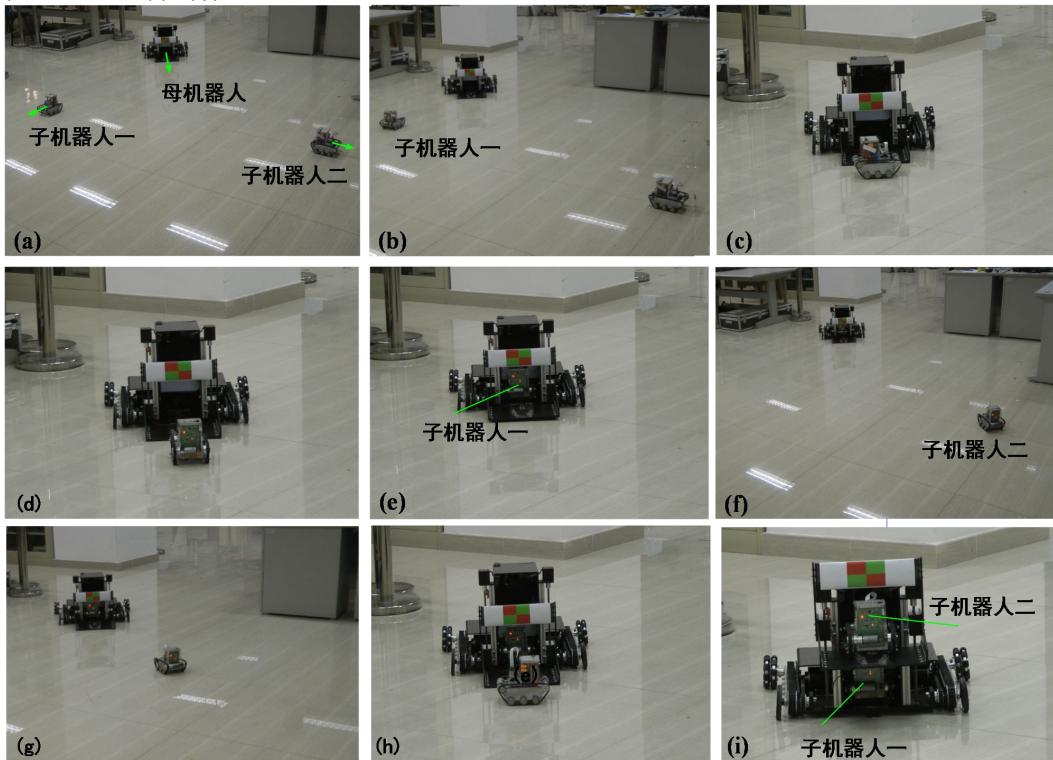


图 5-17 实验 3 视频截图。(a)~(e)子机器人一入舱; (f)~(i)子机器人二入舱;

整个入舱过程中两个子机器人的运动轨迹及相关视觉信息如图 5-18 所示。由图 5-18(a)所示的入舱轨迹可以看出，两个子机器人在抵近入口后修正入舱位姿时，均采用了短距离退行的策略。由图 5-18(b)所示的视觉信息可以看出，子机器人抵近入口后进行位姿调整时，所提取的视觉信息虽然有较大幅度的振动，但在最后阶段位于入口正前方修正航向时相关视觉信息趋于稳定并满足了式(5-9)所需求的条件。

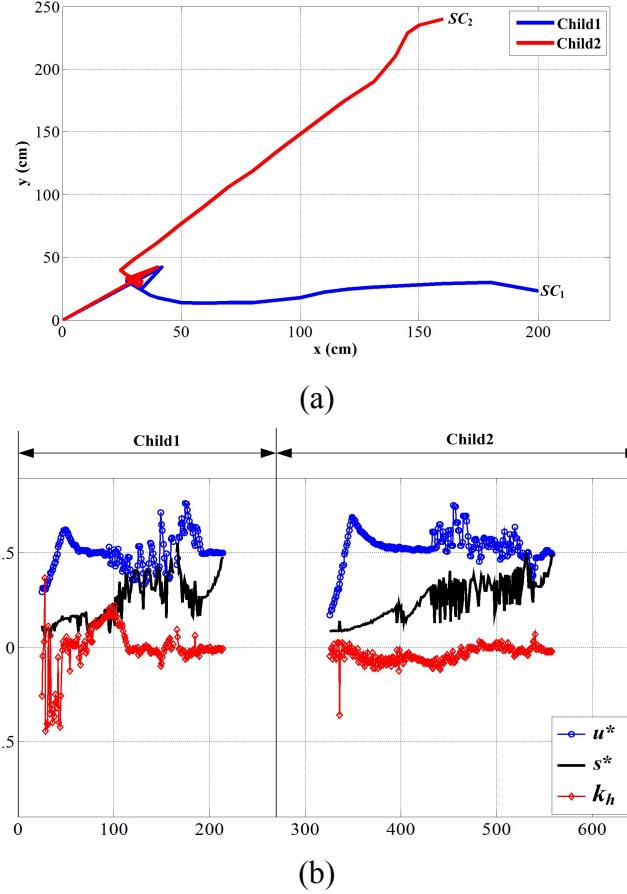


图 5-18 实验 3 的实验结果。(a) 子机入舱轨迹; (b) 所提取的引导标识的视觉信息

实验 4 为对比试验，用于比较利用子机器人单独入舱和子母协调式回收的入舱时间消耗。图 5-19 给出了子机器人 10 个不同的起始位置，每个起始位置针对两种回收方式各进行 3 次实验，统计其时间消耗。图 5-20 展示了子机器人由位置 1 出发的两种入舱方式的轨迹，可以看出采用子母协调的入舱方式，子机器人的轨迹较短。图 5-21 对比了两种入舱方式的时间消耗，可以看出在多数情况下，采用子母协调式回收方式所消耗的时间明显小于机器人单独入舱。在起始位置 5 和 6，两种方式的时间消耗差距并不明显，这主要是因为子机器人向回收舱入口趋近时，入口法向已基本同子机器人的航向一致，此时母机器人在协调回收方式中所起到调整入口法向的优势没有发挥出来。

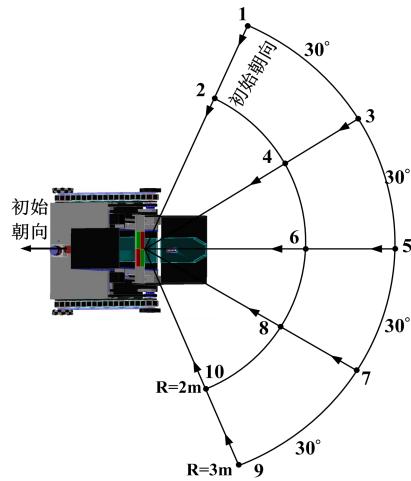


图 5-19 实验 4 子机器人入舱的起始位置设定

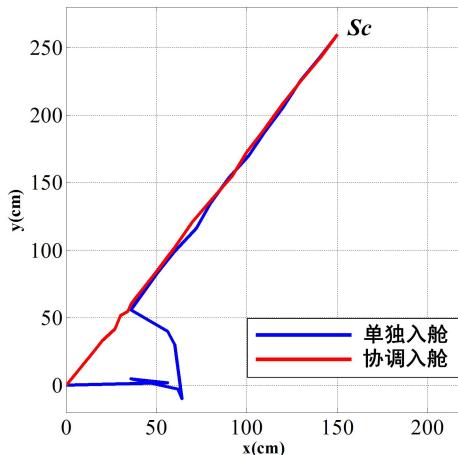


图 5-20 子机器人由位置 1 出发的两种入舱方式轨迹对比

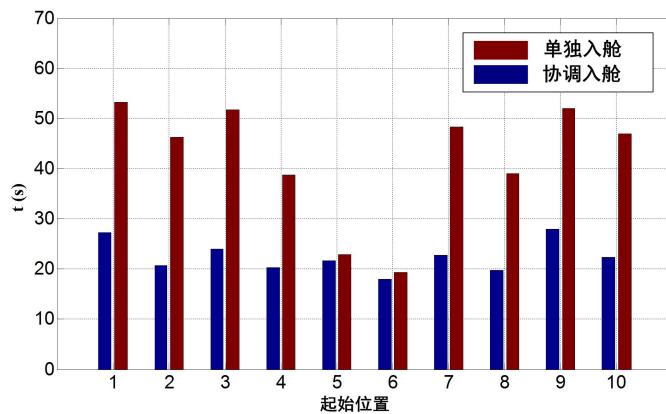


图 5-21 实验 4 两种入舱方式时间消耗

为验证协调式回收方法的可重复性，在图 5-11 所示的室外环境中让子机器人由

从回收舱的不同距离出发，以 0.3m 为间隔，设置了 0.5m 到 2.6m 共八个区段范围，每个区段内各随机进行了 30 次子机器人回收实验，一次入舱成功率如图 5-22 所示。可以看出当子母机器人间距离超出一定范围后，成功率降低，原因可能是室外路面环境、所捕获引导标识的图像尺寸等因素所造成的。

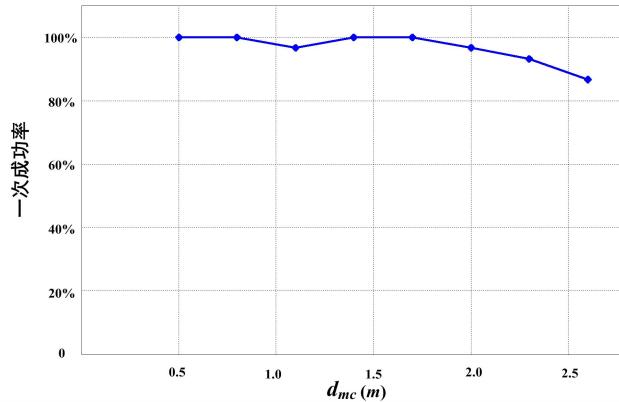


图 5-22 子机器人一次入舱成功率测试

5.6 本章小结

本章针对子机器人自主回收问题，提出了一种基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法，主要研究内容包括：

- 4) 基于子机器人的嵌入式视觉平台对双色十字标识进行识别和信息提取，针对特征不变区间设计图像处理算法，以提高算法在嵌入式平台的运算实时性，使子机器人依靠有限的运算资源完成图像处理。
 - 5) 解析视觉信息同入舱位姿间的关联，建立成像斜率-入舱角模型为回收策略提供依据。
 - 6) 设计子母协调式入舱策略并构建任务状态模型，实现了子机器人和母机器人的协调，提高了子机器人的回收效率；此外还针对回收舱固定的情形，给出了子机器人位姿调整策略。
 - 7) 此外，对子机器人最终的入舱位姿误差进行了估算。
- 实验结果表明了所提方法的有效性。

第6章 总结和展望

子母式机器人系统通过整合母机器人优良的运送能力和子机器人运动的灵活性，实现对环境适应性的提升和工作空间的有效拓展，具有重要研究意义和实用价值。本文针对子母式机器人系统的设计与协调控制开展研究，重点集中于系统设计、子机器人之间的协调、子机器人回收等方面。取得的主要研究成果如下：

(1) 设计并实现了一种包含多异构子体的子母式机器人系统。开发完成了具备升降式回收舱从而实现子机器人灵活调度的母机器人，研制出两款功能不同的子机器人：轮式移动机械臂和履带型视觉子机器人，设计了它们的嵌入式控制系统，并给出了子母式机器人系统的通讯框架。

(2) 面向履带型视觉子机器人与轮式移动机械臂协调配合的指定作业区域物品更换作业，设计了一种基于激光传感器和编码器融合的自定位算法，提出了基于弱旋转约束的相对位姿视觉测量算法并结合基于离轴点的 leader-follower 方式实现了子机器人之间的跟随。此外，采用柱面坐标系简化 eye-in-hand 控制方式用于机械臂的物品操作。实验结果表明所提方法能够使得两个子机器人协调抵达指定作业区域并顺利完成目标物品的更换任务。

(3) 提出了一种基于母机器人观测指引的子机器人回收方法，基于母机器人视觉提取出的视野方位系数和边界比例因子图像特征，分析了其同子机器人入舱位姿间的关联并给出了定性的入舱指引策略，在此基础上，设计了含模糊控制的二级控制器用于修正子机器人入舱航向，实现了母机器人对子机器人的回收。所提方法的有效性通过实验进行了验证。

(4) 设计了一种基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法。子机器人视觉提取母机器人回收舱入口处的引导标识，得到图像特征不变区间并通过全局稀疏遍历和有限局部遍历的处理方式，实时获取标识的中心点横坐标、成像斜率和水平成像长度，通过分析其与子机器人入舱位姿之间的关联，建立成像斜率-入舱角模型，并以该模型为基础设计了子母协调式的回收方法，在子机器人趋近回收舱入口的同时，母机器人调整回收舱入口的法向，通过子母协调的方式有效提高了子机器人的回收效率。此外，对子机器人最终的入舱位姿误差进行了估算。实验结果表明了所提方法的有效性。

在现有工作的基础上，可进一步开展的研究工作主要有：

(1) 本文设计的子母式机器人系统中所有成员均为地面移动机器人，应用范围受到一定局限。下一步研究考虑多栖组合形式，将无人飞行器 UAV 作为一种子机器人引入子母式机器人系统，利用 UAV 子机器人的高空探测和信号中继，提高团队作业效率，另外将母机器人物构造为水陆两栖式移动平台，进一步提高系统的环境适应能力。

(2) 在子机器人协调作业研究中，考虑了两个子机器人协调配合在指定作业区域进行物品更换的作业。下一步拟拓展子机器人的作业范围，并借助母机器人的环境理解能力指导帮助子机器人执行更复杂的作业任务。

(3) 基于母机器人观测指引的子机器人回收方法中，所设计控制器采用模糊加 PD 控制的形式，其有效性进行了实验验证。在后续研究中拟考虑引入神经网络以提高回收方法的鲁棒性。

(4) 本文所设计的子母协调式回收方法中，通过母机器人的原地转动调整回收舱入口的朝向以配合子机器人入舱，有效的提高了回收效率，下一步拟综合全体机器人的当前状态，做出群体性的优化决策，进而实现系统整体回收性能的提升。

参考文献

- [1] 谭民. 机器人群体协作与控制的研究. 自动控制领域发展战略研讨会论文集, 北京, 1999: 185-190.
- [2] 谭民, 徐德, 候增广, 王硕, 曹志强. 先进机器人控制系统. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [3] Bicchi A, Fagiolini A, Pallottino L. Towards a Society of Robots, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2010, 17(4): 26-36.
- [4] 张晗, 陈卫东, 王景川. 多机器人探索系统的人机共享控制, 机器人, 2015, 37(1): 17-24.
- [5] 谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统. 清华大学出版社, 2005.
- [6] Cao Y U, Fukunaga A S, and A. B. Kahng. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 7-27.
- [7] 王硕. 多机器人系统协调协作理论与应用的研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2001.
- [8] 曹志强. 未知环境下多机器人协调与控制的队形问题研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2002.
- [9] Murphy R R. Marsupial-like mobile robot societies. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents*, 1999: 364-365.
- [10] Lindemuth M, Murphy R R, Steimle E, et al. Sea Robot-Assisted Inspection. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2011, 18(2): 96-107.
- [11] 周超. 子母式仿生机器鱼的建模、控制与协作研究[博士学位论文]. 北京: 中科院自动化研究所, 2008.
- [12] Hourani H, Wolters P, Hauck E, et al. A Marsupial Relationship in Robotics: A Survey. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2011: 335-345.
- [13] Eduardo P, Francisco M, Ricardo M, et al. An Autonomous Surface-Aerial Marsupial Robotic Team for Riverine Environmental Monitoring: Benefiting from Coordinated Aerial, Underwater, and Surface Level Perception, *IEEE International*

- Conference on Robotics and Biomimetics*, 2014.
- [14] 蔡自兴. 机器人原理及其应用. 中南工业大学出版社, 1988.
 - [15] 杨毅. 智能移动机器人的研究与开发[硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2004.
 - [16] 王旭. 基于 Spiking 神经网络的机器人控制研究[博士学位论文]. 北京: 中科院自动化研究所, 2010.
 - [17] 蔡自兴. 多移动机器人协同原理与技术. 北京: 国防工业出版社, 2011.
 - [18] <http://www.swarm-bots.org>
 - [19] Fukuda T, Nakagawa S, Kawauchi Y, Buss M. Self organizing robots based on cell structures-CEBOT. *Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots*, 1988: 145-150.
 - [20] <http://unit.aist.go.jp/is/frrg/dsysd/mtran3/index.htm>
 - [21] <http://www.isi.edu/robots/superbot.htm>
 - [22] <http://www.ai.sri.com/centibots.htm>
 - [23] Howard A, Parker L E, Sukhatme G S. Experiments with a large heterogeneous mobile robot team: exploration, mapping, deployment, and detection. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(5-6): 431-447.
 - [24] Caloud P, Choi W, Latombe J C, et al. Indoor automation with many mobile robots, *Proceeding of IEEE international Workshop on Intelligent Robotic system*, July, 1990:67-72.
 - [25] Mataric M J. Issues and Approaches in the Design of Collective Autonomous Agents. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 1995(16): 321-331.
 - [26] Parker L E. L-ALLIANCE: Task-oriented multi-robot learning in behavior-based systems. *Advanced Robotics*, 1996, 11(4): 305-322.
 - [27] Brown H B, Vande W J, Bererton C A, et al. Millibot trains for enhanced mobility. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7(4): 452-461.
 - [28] Gilpin K, Kptay K and Rus D. Miche: Modular Shape Formation by self-Dissassembly. *IEEE International Conference on Robotic and Automtion*, 2007: 2241-2247.
 - [29] <https://symbriion.ipvs.uni-stuttgart.de/tiki-index.php>
 - [30] Liu J G, Wang Y C, Li B, Ma S G, Tan D L. Center-configuration selection technique for the reconfigurable modular robot. *Science in China Series F*:

- Information Sciences.* 2007, 50(5): 697-710.
- [31] Wei H X, Chen Y D, Tan J D, et al. Sambot: a self-assembly modular robot system. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2011, 16(4): 745-757.
- [32] 肖人彬. 群集智能特性分析及其对复杂系统研究的意义. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(3):10-19..
- [33] <http://www.cs.ualberta.ca/kube/research.html>
- [34] Damien M. Recovery in autonomous robot swarms. Berlin: Heidelberg, 2008: 243-252.
- [35] J. Seyfried, M Szymanski. The I-SWARM project: intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation. *Swarm Robotics*, Beilin: 2005: 70- 83.
- [36] Hauert S, Zufferey J. Evolved swarming without positioning information: an application in aerial communication relay. *Autonomous Robots*, 2009, 26(1): 21-32.
- [37] Wills M, Burmeister A, Nelson T, et al. The development of a UGV-mounted automated refueling system for VTOL UAVs. *Unmanned Systems Technology VIII*, 2006.
- [38] Lundh R, Kaelson L and Saffiotti A. Autonomous Functional Configuration of a NetWork Robot System. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(10): 819-830.
- [39] Murphy R, Todokoro S, Nardi D, et al. A Search and rescue robotics, Part F. Springer Handbook of robots. Heidelberg: Springer, 2008.
- [40] Tews A D, Sukhatme G S, Mataric M J. A multi-robot approach to stealthy navigation in the presence of an observer. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004: 2379-2385.
- [41] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985: 500-505.
- [42] 贺超, 刘华平, 孙富春, 夏路易, 韩峥. 采用 Kinect 的移动机器人目标跟踪与避障. 智能系统学报, 2013, 8(2): 426-432.
- [43] Lee L F. Decentralized motion planning within an artificial potential framework (APF) for cooperative payload transport by multi-robot collectives: [M. S. Thesis]. NY, Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2004.
- [44] Zhang C G, Xi Y G. Research on robot path planning methods based on rolling

- windows when the global environmental position is unknown. *Science in China: Series E*, 2001, 31(1): 51-58.
- [45] Ogren P, Leonard N E. Obstacle avoidance in formation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003: 2492-2497.
- [46] 张磊, 秦元庆, 孙德宝, 等. 基于行为的多机器人任意队形的控制. 控制工程, 2005, 12(2): 174-176.
- [47] 曹志强, 王硕, 张斌. 基于 Motor Schema 的多移动机器人队形优化控制. 控制与决策, 2001, 16(B11): 763-765.
- [48] 孟宪松, 张铭钧. 一种基于行为效用理论的多移动机器人编队协调方法. 机器人, 2003, 25(6): 486-490.
- [49] 曹志强, 张斌, 谭民. 基于行为的多移动机器人实时队形保持. 高技术通讯, 2001, 11(10): 74-77
- [50] Root P, De Mot J. Randomized Path Planning With Deceptive Strategies. *Proceedings of Conference on American Control Conference*, 2005: 1551-1556.
- [51] Kamphuis A, Overmars M H. Motion planning for coherent groups of entities. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004: 3815-3820.
- [52] 曾华, 孙霞林, 江世宏. 基于 BP 神经网络控制的多机器人运动规划(1). 武汉化工学院学报, 2005, 27(1): 76-79.
- [53] Luo C, Yang S X, Stacey D A. Real-time path planning with deadlock avoidance of multiple cleaning robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003: 4080-4085.
- [54] Yang S X, Luo C. A neural network approach to complete coverage path planning. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 718-725.
- [55] 张芳, 颜国正, 林良明. 面向多机器人路径规划的一种基于模糊模型的再励函数结构. 光学精密工程, 2002, 10(2): 148-153.
- [56] Bahvey S, Momtahan O, Meybodi M R. Multi mobile robot navigation using distributed value function reinforcement learning. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003: 957-962.
- [57] 张汝波, 施洋于. 模糊 Q 学习的多机器人系统研究. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(4): 477-481.

- [58] 孙树栋, 林茂. 基于遗传算法的多移动机器人协调路径规划. 自动化学报, 2000, 26(5): 672-676.
- [59] 张嵛, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究和进展. 智能系统学报, 2008, 3(2): 115-120.
- [60] Gerkey B P, Mataric M J. Multi-robot task allocation: analyzing the complexity and optimality of key architectures. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003: 3862-3868.
- [61] Gerkey B P, Mrtaric M J. Murdoch: publish/subscribe Task allocation for heterogeneous agents. *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agent Barcelona*, 2000: 203-204.
- [62] 郝莉莉, 顾浩, 杨惠珍, 康凤举. 多机器人系统合同网任务分配方法的改进与仿真. 中国造船工程学会电子技术学术委员会—2012 年水下复杂战场环境目标识别与对抗及仿真技术学术交流论文集. 2012.
- [63] Lagoudakis M G, Berhault M, Koenig S, et al. Simple auctions with performance guarantees for multi-robot task allocation. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004: 698-705.
- [64] 曹志强, 张斌, 谭民. 多移动机器人系统个体控制体系结构. 机器人, 2001, 23ss(05): 450-454.
- [65] Chen J, Yan X, Chen H Y, et al. Resource Constrained Multirobot Task Allocation with a Leader-Follower Coalition Method, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010: 5093-509.
- [66] Sayyaadi H, Moarref M. A distributed algorithm for proportional task allocation in networks of mobile agents, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(2): 405-410.
- [67] 刘淑华, 张嵛, 吴洪岩等. 基于群体智能的多机器人任务分配. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(1): 123-129.
- [68] 彭和, 余萍, 彭生祥, 等. 基于遗传算法的多移动机器人编队行为控制. 西南农业大学学报, 2006, 28(3): 507-509.
- [69] Wang X F, Zheng Y Y, Lin H. Missile formation controller design based on disturbance observer and finite-time control. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2014, 23(4): 427-434.
- [70] Weitzenfeld A, Vallesa A, Flores H. A Biologically-Inspired Wolf Pack Multiple

- Robot Hunting Model, *IEEE 3rd Latin American Robotics Symposium*, 2006:120-127.
- [71] Charniak E, Goldman R P. A bayesian model of plan recognition. *Artificial intelligence*, 1993, 64(1): 53-79.
- [72] Lin L J. Reinforcement learning for robots using neural networks[*PhD thesis*]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1993.
- [73] 姜健, 赵杰, 殷希喆, 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1218-1221
- [74] 杨东勇. 多机器人协作的学习与进化方法[博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [75] 吴军, 徐昕, 王健, 贺汉根. 面向多机器人系统的增强学习研究进展综述, 控制与决策, 2011, 26(11): 1601-1610, 1615.
- [76] Mataric M J. Learning in behavior-based multi-robot systems: policies, models and other agents. *Journal of Cognitive Systems Research*, 2001, 2: 81-93.
- [77] Balch T. Behavioral diversity in learning robot teams. [*PhD thesis*]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998.
- [78] Mataric M J. Reinforcement learning in the multi-robot domain. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 73-83.
- [79] 年晓红, 黄琳. 微分对策理论及其应用研究的新进展. 控制与决策, 2004, 19(2): 128-133.
- [80] 袁媛. 多移动机器人协调围捕与控制研究[博士学位论文]. 北京: 中科院自动化研究所, 2011.
- [81] Cheng P, A Short Survey on Pursuit-Evasion Games. Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [82] 马莹. 多机器人系统围捕任务协调与目标识别的研究[硕士学位]. 北京: 中科院自动化研究所, 2009.
- [83] Parsons T D. Pursuit-evasion in a Graph. *Theory and Applications of Graphs*, 1976, 642: 426-441.
- [84] Holloinger G, Kehagias A and Singh S. Probabilistic Strategies for Pursuit in Cluttered Environments with Multiple Robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 3870-3876.
- [85] Kolling A, Carpin S. Pursuit-Evasion on Trees by Robot Teams. *IEEE*

- Transactions on Robotics*, 2010, 26(1): 32-47.
- [86] Yuan Y, Cao Z Q, Hou Z G, et al. Local Sensing based Hunting for Multiple Robots. *IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts*, 2008.
- [87] Gerkey B P, Thrun S, Gordon G. Visibility-based Pursuit-evasion with Limited Filed of view. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(4): 299-315.
- [88] Tan M. Multi-agent reinforcement learning: independent vs cooperative agents. *Proceedings of International Conference on Machine Learning*, 1993: 330-337.
- [89] Xiao D , Tan A H. Self-organizing neural architectures and cooperative learning in a multiagent environment. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2007, 37(6): 1567-1580
- [90] Kaya M, Alhajj R. Modular fuzzy-reinforcement learning approach with internal model capabilities for multiagent systems. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 2004, 34(2): 1210-1223
- [91] Oh S, Schenato L, Chen P and Sastry S. Tracking and Coordination of Multiple Agents Using Sensor Networks: System Design, Algorithms and Experiments. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1):234-254.
- [92] Eklund J M, Sprinkle J and Sastry S. Implementing and Testing a Nonlinear Model Predictive Tracking Controller for Aerial Pursuit/Evasion Games on a Fixed Wing Aircraft. *Proceedings of American Control Conference*, 2005: 1509-1514.
- [93] Vidal R, Shakernia O, Kim H J, Shim D H and Sastry S. Probabilistic Pursuit-Evasion Games: Theory, Implementation, and Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 662-669.
- [94] 张文文. 多机器人围捕与分布式目标跟踪的研究[硕士学位]. 北京: 中科院自动化研究所, 2010.
- [95] 苏治宝, 陆际联. 多移动机器人队形控制的研究方法, 机器人, 2003, 25(1): 88-91.
- [96] 杨丽. 多机器人系统动态跟随与队形控制研究[博士学位论文]. 北京: 中科院自动化研究所, 2009.
- [97] Tanner H G, Pappas G J and Kumar V. Leader-to-formation Stability. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(3): 433-455.

- [98] Shao J, Xie G, Yu J, et al. Leader-Following Formation Control Of Multiple Mobile Robots. *IEEE International Symposium on Mediterrean Conference*, 2005: 808-813.
- [99] Guo J, Lin Z, Cao M and Yan G. Adaptive Control Schemes for Mobile Robot Formations with Triangularised Structures. *Control Theory Applications*, 2010, 4(9): 1817-1827.
- [100] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926-939.
- [101] Su Z B, Lu J L. Formation Feedback Applied to Behavior-Based Approach to Formation Keeping. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2004, 13(2): 190-193.
- [102] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387-403.
- [103] 何真, 陆宇平, 刘燕斌. 基于虚拟结构的分布式编队控制方法. 应用科学学报, 2007, 25(4): 387-391.
- [104] Ren W, Sorensen N. Distributed Coordination Architecture for Multi-robot Formation Control. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(4): 324-333.
- [105] Baras J S, Tan X B and Hovareshti P. Decentralized Control of Autonomous Vehicles. *IEEE Conference on Decision and Control*, 2003: 1532-1537.
- [106] Xue D, Yao J, Chen G and Yu Y L. Formation contorl of Networked Multi-agent Systems. *Control Theory Applications*, 2010, 4(10): 2168-2176.
- [107] 程龙. 具有复杂动力学的多智能体系统一致性控制及其应用[博士学位论文]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2009.
- [108] 张国良, 汤文俊, 曾静等. 考虑通信状况的多机器人 CSLAM 问题综述. 自动化学报, 2014, 40(10): 2073-2088.
- [109] 潘薇. 多移动机器人地图构建的方法研究[博士学位论文], 长沙:中南大学, 2009.
- [110] Burgard W, Moors M, Fox D, et al. Collaborative Multi-Robot Exploration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000: 476- 481.
- [111] Choi K, Lee S. An enhanced CSLAM for multi-robot based on unscented kalman filter. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(1): 102-108.

- [112] Dellaert F, Alegre F, Martinson E B. Intrinsic Localization and Mapping with 2 applications: Diffusion Mapping and Macro Polo localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, 2344-2349.
- [113] Zhou X S, Roumeliotis S I. Multi-robot SLAM with unknown initial correspondence: The robot rendezvous case. *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006:1785-1792.
- [114] Benedettelli D, Garulli A, Giannitrapani A. Cooperative SLAM using M-Space representation of linear features. *Robotic and Autonomous Systems*, 2012, 60(10): 1267-1278.
- [115] Andersson L A, Nygards J. On multi-robot map fusion by inter-robot observations. *International Conference on Information Fusion*, 2009: 1712-1721.
- [116] Hajjdiab H, Laganiere R. Vision-Based Multi-Robot Simultaneous Localization and Mapping. *Proceedings of First Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 2004:155-162.
- [117] Lee H C, Lee B H. Improved Feature Map Merging Using Virtual Supporting Lines for Multi-Robot Systems. *Advanced Robotics*, 2011, 25(13): 1675-1696.
- [118] Lee H S, Lee K M. Multi-robot SLAM using ceiling vision. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009: 912-917.
- [119] Romero V A, Costa O L V. Map Merging Strategies for Multi-robot FastSLAM: A Comparative Survey. *Proceedings of Latin American Robotics Symposium and Intelligent Robotics Meeting*, 2010: 61-66.
- [120] Granstrom K, Schon T B. Learning to close the loop from 3D point clouds. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010: 2089 - 2095.
- [121] Aragues A R, Cortes B J, Sagues A C. Distributed consensus algorithms for merging feature-based maps with limited communication. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59: 163-180.
- [122] Aragues R, Cortes J, Sagues C. Dynamic consensus for merging visual maps under limited communications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, 58(8): 3032 - 3037.
- [123] Murphy R R, Todokoro S, Nardi D, A. Jacoff, P. Fiorini, H. Choset, Erkmen. Search and Rescue Robotics, Part F. Springer Handbook of robots. 2008: 1151-1173.

- [124] Stroupe A W, Huntsberger T, Kennedy B, et al. Heterogeneous Robotic Systems for Assembly and Servicing. *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. 2005.
- [125] Leitner J. Multi-robot cooperation in space: A survey, *Proceedings of Advanced Technologies for Enhanced Quality of Life*, 2009: 144-151.
- [126] Hirose S. Super-Mechano-Colony and SMC Rover with Detachable Wheel Unit, *Proceedings of the ITech COE/Super Mechano-Systems workshop*, 1999: 67-72.
- [127] Sukhatme G S, Montgomery J F, Vaughan R T. Experiments with Cooperative Aerial-Ground Robots. *Robot Teams: From Diversity to Polymorphism*, 2001: 345-367.
- [128] Murphy R R. Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue, *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 2000, 15(2): 14-19.
- [129] Zhao J, Liu G, Liu Y, et al. Research on the Application of a Marsupial Robot for Coal Mine Rescue. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008: 1127-1136.
- [130] Kottas A, Drenner A, Papanikolopoulos N. Intelligent power management: Promoting power-consciousness in teams of mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009: 1140-1145.
- [131] Anderson M O, McKay M D, Richardson B S. Multirobot automated indoor floor characterization team. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1996, 2: 1750-1753.
- [132] Mullens K D, Pacis E B, Stancliff S B, et al. An Automated UAV Mission System. *AUVSI Unmanned Systems in International Security*, 2003.
- [133] <http://robotik.dfki-bremen.de/en/research/projects/rimres-1.html>
- [134] Dellaert F, Balch T, Kaess M, The Georgia Tech Yellow Jackets: A Marsupial Team for Urban Search and Rescue. *AAAI Mobile Robot Competition*, 2002: 44-49.
- [135] Hougen D F, Benjaafar S, Bonney J C, et al. A miniature robotic system for reconnaissance and surveillance. *IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 2000: 501-507.
- [136] Walter M, Anderson M, Burt I, Papanikolopoulos N. The design and evolution of the eROSI robot. *The IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 2984-2989.
- [137] Kadioglu E, Papanikolopoulos N. A method for transporting a team of miniature

- robots. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003: 2297-2302.
- [138] Drenner A, Janssen M, Kottas A, et al, Coordination and Longevity in Multi-Robot Teams Involving Miniature Robots, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013, 72(2): 263-284.
- [139] Zhou C, Cao Z Q, Wang S, Tan M. A marsupial robotic fish team: Design, motion and cooperation. *Science China-Technological Sciences*, 2010, 53(11): 2896-2904.
- [140] Bing Z G, Dang Q, Liu Y, Liu J T. Multi-Robot Cooperated Sensor Networks Hierarchical Expanding Deployment and Perception Architecture. *International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2009: 191-195.
- [141] Gray J P, Mason J R, Patterson M S, Skalny M W. ROBODEXS: multi-robot deployment and extraction system. *The International Society for Optical Engineering*. 2012: 296-304.
- [142] Kai M W, Christian D, Bernhard N, et al. Coordinating heterogeneous teams of robots using temporal symbolic planning, *Autonomous Robots*, 34(4): 277-294..
- [143] Minten B W, Murphy R R, Hyams J, et al. Low-ordercomplexity vision-based docking. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(6): 922-930.
- [144] Min H J, Drenner A, Papanikopoulos N. Autonomous Docking for an eROSI Robot Based on a Vision System with Points Clustering. *Proceedings of Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2007: 1659-1664.
- [145] <http://www.ufactory.cc/>
- [146] 焦继乐. 移动机械臂的自主抓取与协调控制研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2014.
- [147] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制(第二版). 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [148] Jongusuk J, Mita T. Tracking control of multiple mobile robots: a case study of inter-robot collision-free problem. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, 3: 2885-2890.
- [149] 孙增圻, 邓志东, 张再兴. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [150] 诸静. 模糊控制原理与应用. 北京: 机械工业出版社, 1998.

致谢

首先衷心的感谢我的导师徐德研究员，从论文的选题到课题的研究徐老师均给予了亲切关怀和悉心指导。徐老师在治学道路上严谨求实，厚积薄发，工程实践中勇于攻艰，技术精湛，在生活中谦和质朴，宽厚仁爱，让学生如沐春风，敬佩不已，即临而立之年前，学生会再接再励，从徐老师的言行身教和论文著作中习德学艺。

衷心的感谢联合指导老师曹志强副研究员，在我研究生期间，曹老师亦师亦友：学术创作上，曹老师执手亲授，谆谆不倦，让性格急躁、粗心马虎的我渐渐学会以宠辱不惊的心态，严谨求实地去表达思想、提炼知识；工程攻艰中，曹老师谦和敏锐，处变不惊，总是实事求是的让我选择和执行正确方案，在我急躁鲁莽时帮助我静下心来应对难题；生活上，曹老师豁达开朗，和学生打成一片，让师兄弟姐妹们相亲相爱。这份师生情谊，我会永远珍惜！

特别的感谢谭民研究员由始至终对我课题的指导和关注，谭老师源源不断的鼓励关怀，让我力量十足克服了一个又一个困难完成挑战。非常荣幸能在谭老师的所领导的科研团队中学习和生活，这些年充实快乐，既学到了丰富的机器人学科知识，掌握了较为系统的机器人研发技术，领悟到一位科研工作者所应承载的社会责任，树立了造物育人的人生志向。这些年所见识到的谭老师淡泊宁静，德艺双馨的情怀风范，将作为宝贵的精神财富让我终身受益！

感谢侯增广、梁自泽、王硕、赵晓光、喻俊志、景奉水、周超、程龙、方灶军等老师，感谢他们所积累的浑厚而宝贵的技术、理论和经验，感谢他们所营造的积极向上的科研氛围。

感谢张雪贞老师、闫研、王爱华和管永婷等老师，感谢他们对我生活的关心和帮助，尤其是张雪贞老师在我生病困难时对我的关心和鼓舞，还要感谢这些实验室老师每每每天的默默耕耘和精敲细算，让我们能及时获取试验材料或设备，享受便捷的科研服务。

感谢李磊、邸凌、胡蓉、曹娟、鞠召艳等研究生部老师的辛勤工作，让我的研究生生活有条不紊地进行。

感谢师哥姐，王旭，沈飞，苏虎，刘希龙和焦继乐，他们陪伴和关心爱护让我倍感快乐和温暖。感谢师弟妹，袁文博，王宇，肖俊东，艾坤，张鹏，陈世锋，常

慧，徐令仪，他们的鼓励和欣赏让我科研时动力十足。尤其感谢技术精湛而富有朝气的陈旭潮师弟，在我科研最困难的时候，帮助我升级子机器人的嵌入式控制系统，带着我学习了全新的嵌入式视觉开发技术，让我克服难关并极大地提升了科研品质和进度。非常感谢袁俊和刘健冉师弟，他俩出谋划策帮助我完善了轮式移动机械臂。

衷心感谢实验室同届伙伴魏清平，吴正兴，孙飞虎和王云鹏，和你们这些高材生成行成伍，相互帮助，一同吃饭，一同科研，一同找工作憧憬未来，自豪且快乐！

感谢我亲爱的父母和家姐，感谢你们多年来对我的养育和照顾！

最后，感谢各位专家在百忙之中抽出时间来审阅我的论文和参加答辩。

个人简历与研究成果

个人简历

赵鹏，男，汉族，中共党员，1987年8月出生于湖北荆州。2006年考入北京机械工业学院学习机械设计制造及其自动化专业，2010年7月获得工学学士学位。同年9月被中国科学院自动化研究所录取硕博研究生，专业是控制理论与控制工程，研究方向是子母式机器人系统的设计与协调控制。在学期间，主要参与了两项国家自然科学基金项目的研究，研制完成了包含一种母机器人和两种子机器人的母式机器人系统的机械结构、控制电路、嵌入式控制软件框架、子机器人自定位算法、相对位姿视觉测量算法的设计，以及基于母机器人观测指引的子机器人回收方法和基于子机器人视觉伺服的子母协调式回收方法等内容的研究工作。

博士期间参与的课题

1. 国家自然科学基金“多子体灵活收放的子母式机器人控制与协调研究”
2. 国家自然科学基金“静态节点社区感知网络下的多机器人协调机理与控制研究”

已发表和录用的论文

- [1] **Peng Zhao**, Zhiqiang Cao, Nong Gu, Chao Zhou, De Xu, Min Tan. A Coordinated Docking Approach Based on Embedded Vision, *International Journal of Robotics and Automation*. (Accepted) (SCI 源)
- [2] 赵鹏, 曹志强, 徐德, 陈旭潮. 一种基于嵌入式视觉的子机器人入舱方法, 控制与决策. (In press, web available) (EI)
- [3] 赵鹏, 曹志强, 陈旭潮, 徐德. 一种基于母机器人视觉指引的子机器人回收方法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 29-431,435. (EI)
- [4] **Peng Zhao**, Zhiqiang Cao, Lingyi Xu, Chao Zhou, De Xu. The Design of a Mother Robot for Marsupial Robotic System, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 675-679, Tianjin, 2014. (EI)

- [5] **Peng Zhao**, Zhiqiang Cao, Lingyi Xu, Chao Zhou, De Xu, A Visual Servoing Docking Approach for Marsupial Robotic System, *The 33rd Chinese Control Conference*, 8321-8325, Naging, 2014. (EI)
- [6] Jile Jiao, Zhiqiang Cao, **Peng Zhao**, Xilong Liu and Min Tan, Bezier Curve Based Path Planning for A Mobile Manipulator in Unknown Environments. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 1864-1868, Shenzhen, 2013.
- [7] Jile Jiao, Zhiqiang Cao, **Peng Zhao**, Xilong Liu and Min Tan, Autonomous Grasp of the Embedded Mobile Manipulator with an Eye-in-hand Camera. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Miami, 2014. (EI)
- [8] 焦继乐, 曹志强, **赵鹏**, 谭民. 基于模糊趋近的移动机械臂目标抓取方法研究. 华中科技大学学报(自然科学版). 2013, 41(SI):47-50. (EI)
- [9] Lingyi Xu, Zhiqiang Cao, **Peng Zhao**, Yixin Yin, The Identifier-based Relative Position Estimation for Leader-follower Robotic System, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1691-1695, Tianjin, 2014. (EI)

发明专利:

- [1] 曹志强, **赵鹏**, 周超, 徐德, 谭民. 一种应用于子母式机器人的升降式运输舱, 发明专利, 申请号: 201410333909.9
- [2] 任光, 戴亚平, **赵鹏**, 曹志强, 沈飞. 应用于水下机器海豚的重心调节装置, 发明专利, 授权公告号: CN102632978B
- [3] 曹志强, 焦继乐, **赵鹏**, 周超, 谭民. 一种使移动机械臂趋近并抓取目标物体的方法, 发明专利, 申请号: 201310520979.0
- [4] 曹志强, 程龙, 周超, 徐德, 谭民, **赵鹏**, 陈旭潮. 一种基于母机器人视觉的子机器人入舱方法, 发明专利, 申请号: 201310516094.3

获奖情况:

- [1] 2014 年 6 月 获中国科学院大学“三好学生”荣誉称号
- [2] 2015 年 5 月 获中国科学院大学“三好学生”荣誉称号
- [3] 2015 年 5 月 获中国科学院自动化研究所“攀登一等奖学金”(工程类)