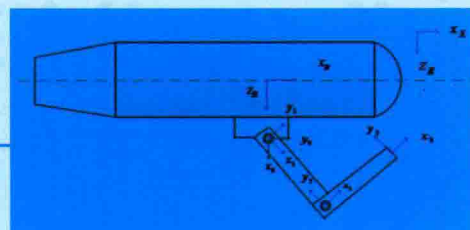


UVMS系统控制技术

UVMS XITONG KONGZHI JISHU

魏延辉 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

UVMS 系统控制技术

魏延辉 编著

内 容 简 介

本书介绍水下机器人—水下机械臂系统的数学建模、运动学和动力学分析方法、水下机器人稳定分析方法、运动控制方法、水下机器人和 underwater 机械臂协调控制等知识,在充分分析和总结该领域最新的先进研究成果基础上,对无缆自主型水下机器人、有缆作业水下机器人、水下机械臂以及相互组合系统提供翔实分析过程和仿真实例,针对不同控制对象提供相应的控制模型和控制方法。

本书可作为从事水下航行器的研究和设计人员的参考书,也可作为相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

UVMS 系统控制技术/魏延辉编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5661 - 1412 - 9

I. ①U… II. ①魏… III. ①水下作业机器人—空间机械臂—研究 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 311666 号

责任编辑 雷 霞

封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号

邮政编码 150001

发行电话 0451 - 82519328

传 真 0451 - 82519699

经 销 新华书店

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 18.75

字 数 468 千字

版 次 2017 年 4 月第 1 版

印 次 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价 59.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

结合国家在“十三五”对海洋开发战略要求,水下机器人研究开发成为热点,也是人类进行海洋探索和开发的重要工具。随着海洋开发进度不断发展,人类希望水下机器人不仅具有观测能力,还要具有一定的作业能力,因此水下机器人安置水下机械臂的组合系统具有广阔的研究前景和重要的工程意义。全书共分为九章,是一本介绍水下机器人和水下机械臂复合系统控制方法的书籍。该书根据组成系统的不同部分,介绍目前世界上最新的研究成果,同时结合作者多年的研究成果,介绍不同控制特点和方法,为广大读者和同行们提供参考依据,为推动作业型水下机器人的发展起到一定的推动作用,具有一定的社会意义和学术价值。

本书能够出版,首先感谢国家自然科学基金委(基金编号:51205074,51309058)、国家科学技术部国际科技合作项目(基金编号:2014DFR10010)和中央高校基本科研经费(基金编号:HEUCF041603)给予本书的资金支持;该书总结和引用了该领域许多前辈和专家的研究成果,也是近几年来作者和课题组学生一起努力的成果,为此特别要感谢杜振振硕士、周卫祥博士、刘鑫博士、陈巍博士、盛超硕士、王泽鹏硕士、于园园硕士、杨子扬硕士、胡加兴硕士、贾献强硕士,等等,感谢你们辛勤的工作,我们在一起度过难忘的学习时光,本书也献给他们。

限于编者的学识和能力有限,本书不免存在缺陷和不足,肯请同行专家和广大读者批评指正,共同促进这一领域研究的深入开展。

编著者

2016 年 10 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 UVMS 研究现状	2
1.2 UVMS 运动建模及规划策略	9
1.3 UVMS 控制策略	10
参考文献	14
第2章 基本数学知识	18
2.1 坐标系及坐标变换	18
2.2 空间变换与描述	21
2.3 水下机械臂连杆以及连杆参数	24
2.4 D-H 矩阵表示法	26
2.5 拉格朗日法——UVMS 系统建模	28
第3章 水下机器人运动学和动力学建模方法	35
3.1 水下机器人的结构	35
3.2 坐标系及坐标转换	36
3.3 动力学方程的建立	37
3.4 基本的流体动力学	41
3.5 水下机器人的运动学方程	45
3.6 ROV 运动学建模方法	46
3.7 ROV 受力分析	48
3.8 ROV 动力学建模方法	55
3.9 ROV 运动学模型解耦方法	60
参考文献	68
第4章 典型水下机械臂运动学和动力学推导	70
4.1 水下机械臂基本运动学和动力学方法	70
4.2 七功能和五功能水下机械臂运动方程的建立	74
4.3 七功能水下机械臂和五功能水下机械臂逆运动学分析	87
4.4 机械臂动力学建模	94
4.5 水下机械臂动力学模型	105
参考文献	119

第 5 章 水下机器人稳定性分析方法	120
5.1 运动稳定性的基本定义	120
5.2 水下机器人运动稳定性的研究	121
5.3 ROV 系统稳定性分析	129
5.4 ROV 单自由度稳定性分析	131
参考文献	133
第 6 章 ROV 运动控制方法	134
6.1 深海作业型 ROV 操纵性验证	134
6.2 深海作业型 ROV 六自由度运动控制器选择策略	143
6.3 横摇和纵倾运动的 PID 控制器设计	143
6.4 垂向与艏向运动的带有 NDO 的自适应 Terminal 滑模控制器设计	151
6.5 轴向与侧向运动的自适应 Backstepping 滑模控制器设计	164
6.6 ROV 多控制器六自由度联合控制	175
参考文献	189
第 7 章 水下机器人的运动控制器设计	190
7.1 计算扭矩控制器的设计	190
7.2 无源自适应控制器的设计	195
7.3 海流引起干扰的自适应补偿	199
7.4 输入的不确定性补偿	203
7.5 实验结果与分析	204
参考文献	212
第 8 章 AUV 水下机械臂的协调控制方法	213
8.1 垂直面内 UVMS 数学模型	213
8.2 自适应反步方法以及非线性干扰观测器	218
8.3 垂直面 UVMS 控制器设计	220
8.4 水平面内 UVMS 数学模型	229
8.5 模糊逻辑控制	232
8.6 自适应模糊滑模控制	238
8.7 水平面 UVMS 引入 NDO 的自适应模糊滑模策略	243
8.8 神经网络控制概念介绍	252
8.9 n 自由度水下机械臂控制器设计	254
8.10 垂直面水下机械臂控制	256
参考文献	266

第 9 章 ROV 与水下机械臂的协调控制方法	267
9.1 引言	267
9.2 反演法原理	268
9.3 ROV 模型测试与分析	271
9.4 反演算法的应用	275
9.5 系统的模型搭建	280
9.6 反演控制器的设计	284
9.7 仿真与分析	285

第 1 章 绪 论

海洋是 21 世纪的重要资源宝库^[1,2],在当今世界能源隐患和全球变暖的大环境下,海洋却蕴含大量的矿产资源、油气资源、生物资源等,成为全世界竞相研究和开发的对象。目前世界各国的海洋开发技术水平发展很不平衡,技术先进国家和地区主要包括美国和欧盟以及俄罗斯等少数地区,而且当前的主要技术大都具有军事应用背景,没有完全运用到海洋探索和研究中。我国对于海洋开发的技术仍然处于初级阶段,面对复杂的海洋环境和海洋主权的维护,海洋装备发展显得尤为迫切。

当前水下作业任务大多数仍然需要人类介入才能完成相应操作目标,这类作业过程需要系统具备高带宽通信连接单元以及相对苛刻的工作环境,这些不良因素严重限制了水下作业设备的应用范围和发展前景。鉴于当前对于各种能源开发的迫切需求,海洋因含有丰富的各类资源而受到全球的关注,这也提出了海洋开发研究的装备要求,水下作业机器人平台正是海洋探测的重要装备,其相关技术的研究成为目前比较热门的研究方向。一般地,按照人类介入程度,可以把水下机器人分为自主水下机器人(Autonomous underwater vehicle, AUV)以及遥控操作水下作业机器人(Remotely operated vehicle, ROV)。这两类水下机器人各有优缺点^[3-5],可以根据需要分别用于不同的作业场合和任务。其中, AUV 的智能性较高,可以用于海底海况和水文信息的观测任务,以及少量海底样品的采集工作;而 ROV 则需要在人类操作下,完成较重的作业任务。

水下机器人除去常规的观测和巡视任务外,更被人类所需要的是完成一定的水下操作任务,这就需要依靠水下机械臂系统和机器人本体协同作业。其中遥控型水下机器人虽然研究较早,应用较成熟,但是其需要铠装缆光纤等连接,不易于完成有障碍物,以及恶劣海况下的作业任务,由此可见自主型水下机器人因为体积小和灵活性的优势^[5-7],研究前景更加广阔。考虑到降低设备的质量以提高系统的续航时间。从节约能耗的角度出发, AUV 目前发展的趋势是依靠欠驱动模式工作,即控制提供的控制量不足以同时满足所有运动指标最优,实际的控制输入数目达不到运动自由度的要求。在这种水下机器人和水下机械臂联合的系统中,机械臂的作业就不可避免地对水下机器人本体的运动状态产生扰动,这样使得原本就比较复杂的水下机器人系统与水下机械臂的协同作业成为更复杂的研究内容。

针对这一系列问题,研究人员们将水下机器人和搭载的水下机械臂系统合称为水下机器人-机械臂系统(Underwater vehicle manipulator system, UVMS),为了表述的简洁性,常以其英文简称 UVMS 进行指代。UVMS 根据其水下机器人本体的种类^[5,8],主要划分为两类:第一种是以自主水下机器人 AUV 为本体,搭载水下机械臂的 UVMS,这类系统可以实现在感知作业区域,根据预先编制的程序和传感器信息完成自动校准,在没有操作人员的干涉下,完成搭载机械臂的操作任务;另一种是以遥控型水下机器人 ROV 为本体,搭载水下机械臂的 UVMS,这类系统需要操作人员根据视觉反馈信息,直接对 ROV 以及机械臂发送工作指令,相当于操作人员的一种“遥操作”形式,操作人员对操作的实时性和精度有较大影响。

对于 UVMS 而言,其完成指定的作业任务,多需要水下机械臂系统与水下机器人本体协作完成,可见水下机器人-水下机械臂系统各个分系统的性能表现直接影响到 UVMS 整

体系统水下作业完成表现的优良程度。结合 UVMS 系统的特点,可以得到以下限制其作业性能的主要因素^[8]:

(1)难以获得水下机器人本体、机械臂以及水下作业环境的准确模型,尤其是水动力模型;

(2)UVMS 系统是非线性、强耦合的多输入多输出系统,难以找到对姿态和力学控制比较有效的方法;

(3)对于机械臂和机器人本体之间的影响难以用模型描述;

(4)UVMS 系统是一个运动学冗余系统,水下机器人本体比机械臂系统更加难以控制。

1.1 UVMS 研究现状

UVMS 作为一类重要的海洋开发工具,主要用来完成海底采样、装置维修、危险区域作业等工作。国外对于这项研究进行已久,其中欧美关于 UVMS 的研究工作主要由包括美国的大学和海军研究院、欧盟系统内的大学联合研究机构承担,亚洲的研究活动主要有日本、新加坡和韩国等高等院校及科研机构参与,其部分研究成果已经成功实现商品化,可供有关机构进行采购。国内的主要研究机构为哈尔滨工程大学、中科院沈阳自动化研究所(以下简称中科院沈自所)、华中科技大学、上海交通大学、中国海洋大学以及中船重工有关研究所,目前仍在积极开展有关研究。

1.1.1 UVMS 国外研究现状

国外关于 UVMS 的研究早在 20 世纪中后期就已经开始,并且部分研究国家已进行了相关理论验证和样机测试等。更为可喜的是,少数研究机构已经研制出一个系列的样机和产品,并进行了海洋测试。作为一项未来的尖端技术,众多的科研机构都投身到这类系统研制中,催生出数个引领 UVMS 发展研究方向的研究机构。早先的研究成果大部分作为机密资料被封锁起来,从 20 世纪 80 年代起,关于水下机器人-机械臂系统的协调控制的数值仿真实验结果开始被陆续公开发表。位于美国 Stanford University 的 Aerospace Robotics 实验室于 20 世纪 90 年代成功研制了 OTTER 系统,实现了自主水下机器人凭借水下机械臂系统在测试海域抓取目标物体^[9],该 UVMS 可以实现在一个六自由度控制的 AUV 上安装具有单个关节的水下机械臂,并且该 AUV 是一个过驱动系统,配备有八个推进器。OTTER 系统的水下机器人本体 AUV 的尺寸大小为长 2.1 m,宽 1 m,高 0.5 m,极大工作深度达 1 000 m 左右,其外形如图 1.1 所示。MBARI/ARL 课题组将搭载有一个水下机械臂关节的 OTTER 系统在地处美国 Monterey Bay 的海洋生物研究所进行了 UVMS 协调控制的实验,通过摄像头装置直接作为系统传感器,实现了水下目标物体定位追踪,依靠逻辑步骤逐步增加水下机器人 AUV 本体的自主能力,实现目标物体的抓取。

在 20 世纪中后期,欧洲以 Heriot-Watt University 为领衔的大学合作团队开启了一项名为 AMADEUS 的研究课题项目^[10],该团队的主要成员包括了英国、意大利在内的数个欧盟成员国大学以及科研机构。AMADEUS 的研究重点集中于改善和提高水下机器人-机械臂系统抓取和转移水下易碎物体目标的灵敏度和协调性。该项目为了满足海洋领域专家的切实需求,提升了在可视性较差环境中的机械臂抓取控制,实现了两个七自由度 Ansaldo 机



图 1-1 “OTTER”型 UVMS

械臂的协调操作。

欧盟在 21 世纪初期,筹划了一项名为“ALIVE”的 UVMS 课题。该项目系统的合作单位为法国的 Cybernetix 公司。该项系统的特点是,水下机器人本体是一个四自由度可控的 AUV,机械臂系统是七自由度的操作臂。该系统可以实现水下目标作业区域的自主导航定位、探测和接近作业面,最终依靠液压卡爪固定在作业面上,这样使得机械臂受到水下机器人本体 AUV 的干扰就减少很多。该套 UVMS 系统的结构如图 1-2 所示,“ALIVE”系统对于后来的 Freesub 等均有深远的影响。

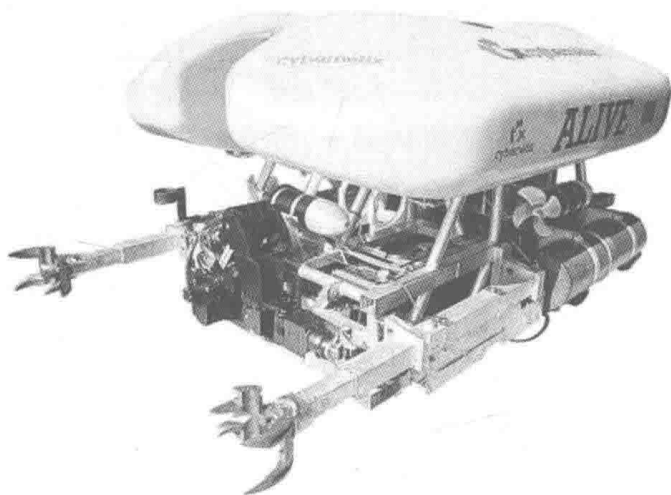


图 1-2 “ALIVE”型 UVMS

SAUVIM 课题(图 1-3)项目是由美国夏威夷大学自动系统实验室(ASL)、夏威夷海洋自主系统工程中心(MASE)以及海军水下战中心(NUWC)罗德岛州新港分部联合进行研究工作^[11]。该套系统装备了 IXSEA 公司的 PHINS 单元,同时依靠辅助的差分 GPS 和多普勒导航仪等,提升了水下机器人本体的定位精度和快速性。SAUVIM 装配了七自由度型号为 MARIS 7080 的机械臂,该机械臂的每个运动自由度都是依靠带有谐波传动的无刷电动机驱

动。这样的结构设计使得可以实现机械臂末端执行器的亚毫米级别的位置固定。需要指出的是,SAUVIM 系统中,机械臂系统部分的质量相比于水下机器人本体的质量差距较大,这种设计思路是为了实现水下机器人-机械臂系统的解耦合,这样才能将整个 UVMS 系统分为两个解耦的分系统,方便控制器的设计。



图 1-3 SAUVIM 课题

日本东京大学的 Institute of Industrial Science 机构研制的自主水下机器人 Twin Burger 在水下机器人的行为表现的智能性上取得了较大进步,该自主机器人在 IIS 测试水池进行了任务测试,结果表明该 AUV 可以实现在避免碰到障碍物的过程中完成矩形轨迹的规划。日本 Kyushu Institute of Technology 的 Ishitsuka 等人在这基础之上^[12],将两自由度水下机械臂安装在 Twin Burger 本体上构成 UVMS 系统,系统的组成如图 1-4 所示。这个 UVMS 系统中,Twin Burger 本体长度 1.3 m,宽度 0.65 m,质量为 120 kg;两自由度水下机械臂的每个连杆的长度均为 0.5 m,质量均为 6 kg。该 UVMS 系统搭载一个多处理器系统作为控制机,同时软件结构采用了分散管理形式,使得整个系统可以执行目标任务。

韩国 Pohang University of Science and Technology 的 Han Jonghui 等研究成员对于 POSTECH 机器人实验室的半自主水下机器人 PETASUS 和五自由度机械臂 PUM 进行组合得到的 UVMS 系统进行了深入的研究^[13],实现最小化恢复运动的系统控制。其中,水下机器人本体 PETASUS 具备六个推进器,推进器为电力驱动装置,可以实现全方向运动的推进器构型配置,是一个全驱动系统。机械臂 PUM 具有五个关节,总长度大概 1.5 m,最终的系统作业效果图如图 1-5 所示。

根据 UVMS 系统的研究现状可以看到,很多成熟的系统虽然都是具有较强的深海作业能力,但是它们往往都拥有笨重的质量,例如 SAUVIM,质量可达 6 t 之大。因此,欧洲的科学技术人员根据浅水环境的作业任务需求,成立了 RAUVI 课题研究组^[14]。该课题组针对轻型 AUV 搭载机械臂设计,实现主体质量在 300 kg 以下,工作深度最深为 500 m 水深的作业研究,其主要设计架构如图 1-6 所示。课题的主要目标是发展和改善 UVMS 水下作业的自主化程度,该团队提出的改进策略分为两大步骤:一是由水下机器人本体 AUV 进行目标区域探测,采集相关数据,实现 AUV 的同步导航定位;二是将信息发送到基站,形成目标区

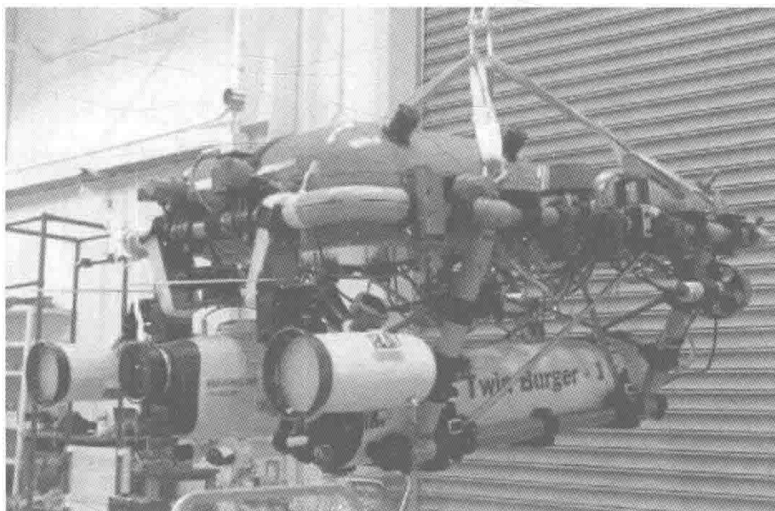


图 1-4 “Twin Burger”型 UVMS

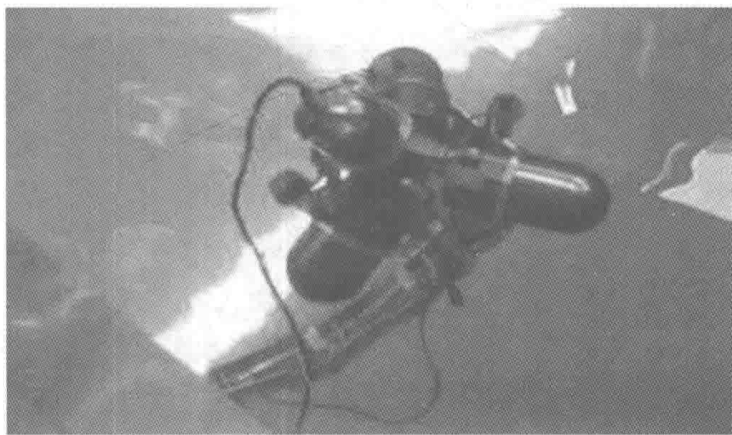


图 1-5 PETASUS 和 PUM 组合型 UVMS

域的虚拟地图重建,然后 AUV 本体根据虚拟地图导航需找到作业目标,紧接着 UVMS 系统作业模式启动,在水下机械臂开始作业时,各个推进器配合完成系统的姿态控制,从而达到 UVMS 操作要求。

欧盟批准了一项以 Universities Jaume 为带头机构并且由八家单位参与的 TRIDENT 研究计划^[15],这个研究的目的是研究、设计和补偿多目标水下作业任务的方法,这项课题将海洋环境导航、多传感器信息采集以及 UVMS 系统的研究和水下机械臂灵巧操纵问题等众多内容巧妙地结合在一起,这也为 UVMS 的智能化提供了基础。

除去上述主要的 UVMS 系统研究设计思路,也不断有研究人员根据实际情况提出更多实际的 UVMS 设计思路。日本 Tokai University 的 Norimitsu Sakagami 教授等人^[16]提出了一种新颖的 UVMS 构型,该设计突破了传统的设计思路,其核心思想是依靠改变 UVMS 的可移动浮力模块进而改变系统整体的浮心位置从而实现较为平稳的深度控制,该设计的样机也经受住了水池实验测试,取得了良好的控制效果(图 1-7)。伊朗 K. N. Toosi University of Technology 的 AliA. Moosavian 等研究人员^[17]研究了水下机器人上安装双机械手系统(图 1-8),以期望完成比较复杂和高精度要求的作业任务,比如在水下实现物体的卡槽安

放过程,这种设计思路有提高水下精细化作业和冗余作业系统的可能性,具有广阔的发展前景。

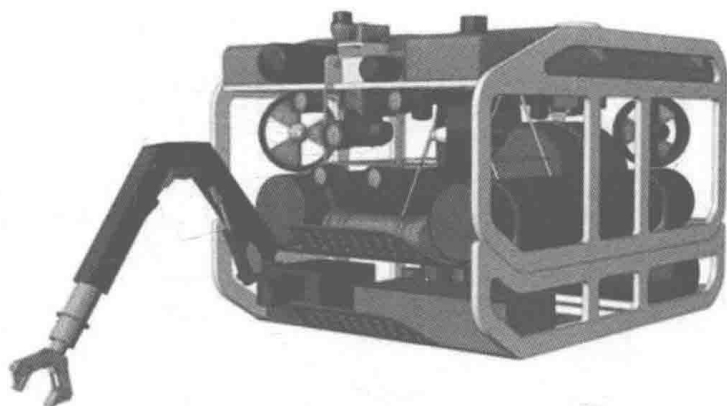


图 1-6 “RAUVI”型 UVMS



图 1-7 重心可调整型 UVMS

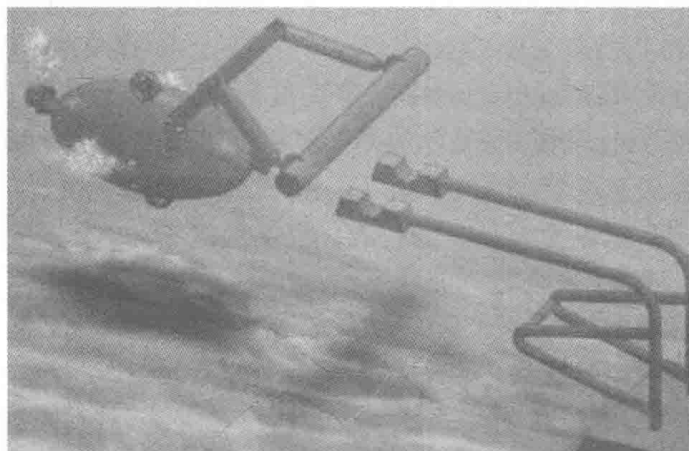


图 1-8 双臂抓取运送型 UVMS

1.1.2 UVMS 国内研究现状

20 世纪,由于国家发展战略的需要,优先发展其他行业,导致与海洋开发相关技术的研究经费投入较少,加之参与的科研机构也比较少,因此与国外相比,关于 UVMS 的研究成果显得相对单薄,但是国内的不少机构克服了各种困难,仍然取得了一系列成果,涌现出了一批有特色的研究机构。

中科院沈自所研制了一套 UVMS 系统,该系统包括两自由度电驱动水下机械臂,该机械臂机构紧密,质量较轻,可以分组拆装;水下机器人本体为长度 2 m 的鱼雷状 AUV,该 AUV 具备多个推进器和尾翼十字舵,可以完成海洋搜寻,也可到达位置悬停,同时该 AUV 也可以根据不同作业任务实现不同的模块组合^[18];在实验水池里,进行了这套 UVMS 系统的实物测试,研究了载体 AUV 的俯仰控制规律,同时实验结果证实了控制器的有效性^[19];同时也对海流作用下的 UVMS 推进系统的分配策略进行了探讨^[20]。

此外,中科院沈自所为了更好地研究 UVMS 的水下识别相关技术,专门研制了一种搭载摄像头的 UVMS 系统平台^[21],如图 1-9 所示。研究人员通过 CCD 视觉摄像头得到相关图像信息,根据基本原理,分析信息得出需要的 UVMS 平台的深度和推力分配策略等,实现 UVMS 依据视觉图像反馈进行姿态控制;为了更好更快地发现作业目标,沈自所的研究人员使用双目立体 CCD 摄像头图像信息^[22],实现根据图像信息构造 UVMS 水下三维作业环境,辅助 UVMS 在复杂作业环境中保证质量地完成相关作业。



图 1-9 中科院沈自所 UVMS 测试平台

中国海洋大学的 UVMS 研究团队在常宗瑜教授的领导下,对于涉及的动力学和建模等

方面进行了探索,主要研究了一种水平面内安装有二自由度水下机械臂的水下机器人-机械臂系统,通过对相关机理的分析和有关模型的建立,完成了水下机器人本体和水下机械臂两个分系统的作业规划,较好地使得水下机械臂末端执行器的轨迹达到目标控制精度,规避了作业过程中的几何构型奇异情况^[23];张喜超通过使用 Adamas 和 Fluent 两套仿真软件,对于上述 UVMS 进行了水动力学分析以及运动过程中的力矩和几何位置分析,研究了水下机械臂末端执行器与作用物体的接触过程,并对这一过程进行了合理优化^[24];徐长密根据动平衡理论,对于水下机械臂完成相同任务的前提下,在不同作业时间内,对于水下机器人本体的影响分析,得出了一种综合考虑作业时效性和系统稳定性的任务规划策略,并通过模拟实验验证该策略的可靠性和可操作性^[25]。

华中科技大学船舶与海洋方向专家徐国华教授也在国家相关基金支持下,从 21 世纪初期开始对水下机械臂系统的驱动装置和机械结构和机械设计等细节问题进行了详细探

讨^[26],并且研制出了水下机械臂样品。其团队内的博士生通过对于水下机械臂在实时变负载以及水池实验等^[27],验证了机械臂的可靠性,并且通过采用硬件和软件系统的联合作用实现深水作业机械臂与各个系统的协作作业^[28,29]。该团队设计的深海作业水下机械臂系统如图 1-10 所示。

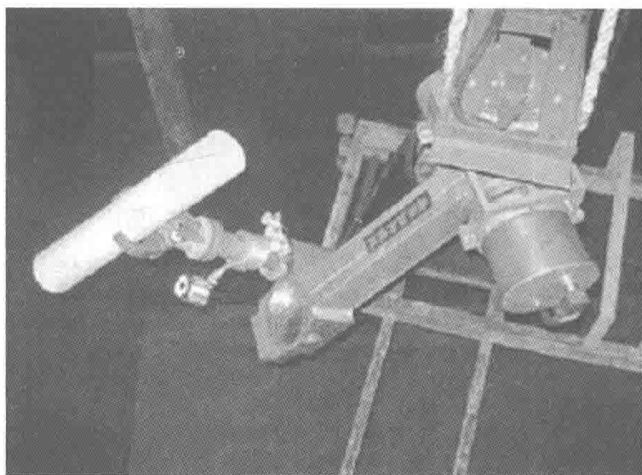


图 1-10 华中科技大学的水下机械臂

哈尔滨工程大学机电学院张铭钧教授团队设计了一种面向小体积 UVMS 系统的电驱动水下机械臂,该机械臂的各关节采用直流电动机作为动力装置,并且在肩、肘、腕等关节连接处使用防水连接器^[30,31],降低了机械臂内部的电气线路互相干扰程度,取得了良好的作业效果,该机械臂的总体结构如图 1-11 所示。其他的研究机构,如 702 研究所的谢俊元研究员^[32]依据深海作业载人潜器的任务需求,研制出操作仿真器,并且对于人介入的水下机械臂操作系统进行了模拟实验。

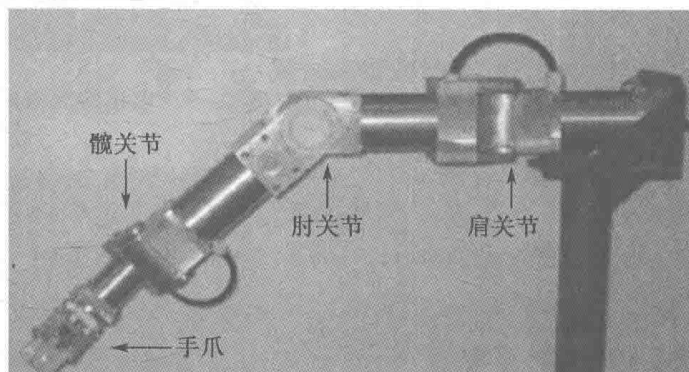


图 1-11 哈尔滨工程大学的水下机械臂

1.2 UVMS 运动建模及规划策略

研究 UVMS 系统,需要依据相应的动力学知识,得到其数学模型,然后才能通过仿真辅助验证有关运动规划策略和控制方法的有效性。因此,基于不同的理论出发,可以得到不同的分析视角和过程。下面就 UVMS 使用较多的建模和运动规划方法进行简要列举。

1.2.1 UVMS 建模策略

UVMS 研究的基础在于构建一个合适的运动学和动力学模型,一般情况下,经常采用基于数学和力学原理以及能量概念的思想完成模型建立,这里主流的建模策略包括: Newton - Euler 迭代策略、Quasi - Lagrange 策略、Kane 策略和 Davies 策略。

1. Newton - Euler 迭代策略

该策略最初应用在工业机械臂系统的建模过程,因为其具有简洁、直观的形式,方便通过编程实现模型变量参数的更新以及计算,但是由于涉及各个分系统间的相互作用的计算^[23,25],当整体系统比较复杂时,往往会使得系统的计算时间较长,影响了模型参数的时效性。最早将该策略引入 UVMS 系统建模的是意大利著名水下机器人专家 Antonelli 等科研人员,他们使用该方法建立了 UVMS 系统模型^[33],并通过实验进行了运用验证。

2. Quasi - Lagrange 策略

该策略是一种以 Lagrange 算法为基础进行改良简化的动力学分析方法,其从数学理论中范数的概念出发,构建出类似于能量概念的数学表达式^[23,25],并且通过数学分析过程求解能量范数的各个参变量的偏导,得到相应的模型框架。美国 Vanderbilt University 的 Cui. Y. 和华中科技大学的郭莹博士均采用 Quasi - Lagrange 策略构建了一体化的 UVMS 系统整体模型^[34,35],并在此基础上设计了控制器,取得了良好的模拟效果。

3. Kane 策略

Kane 策略相比于上述其他两种策略而言,可以高效率地完成整体系统的建模,需要求解的方程也相对较少,但是对于耦合的整体系统来说,需要计算出各个子系统的惯性力^[23,25],这在实际状况中比较难操作,一般更偏向于规则几何体构成的理想系统的建模分析过程。华盛顿大学的 Yang S. P. 在其博士论文(见文献[36])里较早地将 Kane 方法引入到具有多个协同作业水下机械臂的 UVMS 系统中,进行动力学模型的构建。中国海洋大学的 UVMS 课题组^[25]也是在基于 Screw 表达法和 Kane 算法的联合表示,建立了水平面内的动力学模型。

4. Davies 策略

Davies 策略是将德国物理学家 Kirchhoff 在电路分析过程中提出的基尔霍夫定理的基本分析方法和思想迁移到机械系统的动力学和机构分析学中,进而形成的一种分析方法。该方法适合于拥有封闭运动过程的系统的动力学分析,其处理方法是开环的机械系统通过增加虚拟的机械关节以使得运动学参量出现封闭关系,Federal University of Santa Catarina 的 Santos 机器人课题^[37,38]小组正是基于 Davies 算法建立了 UVMS 的整体模型,进而研究了运动过程的冗余和构型奇异问题,巴西 Federal Institute of Parana (IFPR) 机构的 Oliveira 及其研究和作者^[39]提出基于 Clifford Algebra 数学理论,引入 Assur 链,进而最终通过 Davies 策略

建立了 UVMS 系统的双四元素形式的动力学模型。

1.2.2 UVMS 运动学规划算法

对于 UVMS 系统的特殊性,通过对于其搭载的水下机械臂系统以及水下机器人进行相应任务的划分,并且根据规划的任务进行各自分系统的运动规划,针对水下机械臂系统的运动学统筹规划策略,国内外采用的主流算法包括 Gradient Projection 法、Damped Least - Squares 法、Weighted Pseudoinverse 法、Task Prioritization 法等^[5,30]。现对上述算法的主要思想介绍如下:

1. Gradient Projection 法

该方法主要操作过程是完成特定的任务,构建标量势函数,并且基于该标量势函数的梯度求得相应的最小值和最优值,进而决定了水下机械臂的理想构型和位姿状态。根据不同的操作需要,如避免奇异机构、最佳加速度和水底最小阻力及最小能耗等控制目标,都可以构建相应的标量势函数,进而得出运动规划结果。

2. Weighted Pseudoinverse 法

该方法是从数学理论中的范数概念出发,通过对各个系统对于作业过程的影响,设置相应的权重系数,在此基础上得到相应的权重矩阵,将权重矩阵和相应的运动向量联合定义出对应的系统能量函数,并且根据不同的作业任务,相应调整各个权重占比,以使得系统得到相应的优化运动学结果。

3. Task Prioritization 法

该方法的主要思想是将总体任务划分为若干层次级任务,同时对于相应任务设置了相应的优先层级,最高的优先级是避免水下机械臂作业过程中出现关节奇异情况,这种方法适合于时间要求低、控制精度要求高的作业情况,多数用来完成海底喷涂和焊接任务。虽然该算法避免了机械结构的奇异情况,但是也同样引入了一种算法奇异现象,即优先级相同时,需要细分出更加详细的优先顺序,这是其算法的不足之处。

1.3 UVMS 控制策略

当机器人系统拥有比执行操作任务更多的运动自由度时,则该系统成为一个运动学冗余的机械系统。通常对于水下机械臂的作业任务都会被转换为末端执行器的姿态和位置的轨迹规划问题。从这个方面来看,一般实际操作过程中的水下机器人 - 机械臂系统 (UVMS) 在运动学方面以运动冗余性存在的情况居多,同时需要考虑的是当系统工作使得机械臂出现临近奇异值和工作空间边界时,需要控制机器人本体和机械臂进行一定的姿态调整,以期适应这种状态。

UVMS 系统是一个具有众多限制因素的非线性强耦合系统,其复杂性主要表现在:拥有复杂的数学模型;模型知识的不确定性,这里主要的不确定因素是水动力影响因素的分析知识缺乏;水下机器人本体的控制方法的不确定性,因为推进器以及舵控制性能的限制;水下机器人本体和搭载的水下机械臂系统的动力学的耦合特性;传感器系统的灵敏度以及信息传输的时效性,直接影响控制决策的进行。