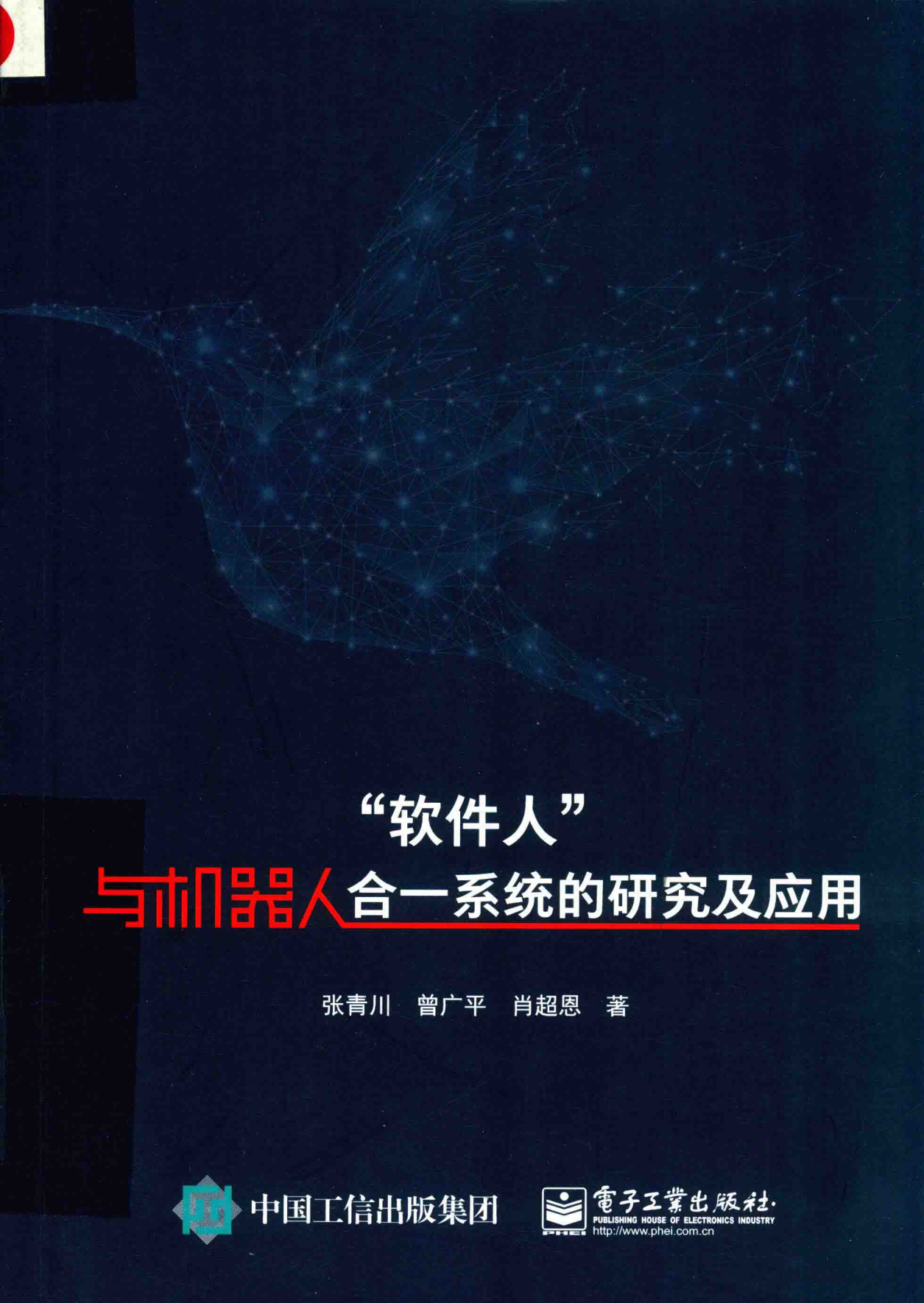




“软件人” 与机器人合一系统的研究及应用

张青川 曾广平 肖超恩 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“软件人”与机器人合一系统的 研究及应用

张青川 曾广平 肖超恩 著



電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书在“软件人”及其系统研究成果与实现技术的基础上,将宿主“软件人”和附体“软件人”引入机器人系统,给出一种“软件人”与机器人合一的技术解决方案,旨在解决现有机器人控制系统封闭、可扩展性差的问题。

本书适合从事计算机科学、控制科学、智能科学及相关领域的科研人员和工程应用人员使用,也可供计算机、自动化、智能科学等相关专业师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

“软件人”与机器人合一系统的研究及应用/张青川,曾广平,肖超恩著. —北京:电子工业出版社,2018.8

ISBN 978-7-121-34944-7

I. ①软… II. ①张… ②曾… ③肖… III. ①机器人—控制—研究 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第201418号

责任编辑:杨秋奎

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:720×1000 1/16 印张:11.75 字数:223千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254755。

前言

自 20 世纪 60 年代机械手诞生以来，机器人技术一直是学术界和工业界的研究热点。世界各国纷纷把突破机器人技术和发展机器人产业放在科技发展的首要位置，并制定各自的发展战略规划。2012 年，美国国家科学基金会（NSF）提出了一项新的跨机构资助计划——国家机器人技术计划（NRI），美国国家科学基金会与美国国家宇航局、美国国立卫生研究院、美国农业部一起开发协助人们工作的机器人，甚至是与人类合作的下一代机器人。2006 年，我国发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》，明确指出把机器人作为未来优先发展的战略技术。

机器人技术集机械、信息、材料、智能控制、生物医学等多学科于一体。机器人控制系统负责机器人的智能、推理、任务规划等，它是机器人技术研究的核心部分。传统的机器人控制系统采用封闭式的方法，采用专用微处理器、专用机器人语言或专用的计算机独立开发。采用封闭式控制系统的机器人虽然具有结构简单、可靠性高的特点，但随着机器人应用领域的不断扩大，其可扩展性差、软件难移植、可复用性低等局限性日益凸显。因此，如何构建开放、标准化、模块化的机器人控制系统，以及如何提高机器人的柔性、可配置性、可扩展性、可移植性和复用性等，成为机器人研究的关键。

目前，世界上大多数商业机器人控制器普遍采用上位机、下位机二级分布式的开放控制系统。上位机负责整个系统管理、运动学计算、轨迹规划等。下位机由多个 CPU 组成，每个 CPU 控制一个关节运动，这些 CPU 通过总线形式的紧耦合与主控机联系，这种结构的控制器工作速度和控制性能明显提高。但是，由于上位机和下位机存在共同的弱点——计算负担重、实时性差，因此，大多数机器

人采用离线规划和前馈补偿解耦等方法减轻实时控制中的计算负担。当机器人在运行中受到干扰时,由于无法及时调整,其任务完成情况可能受到一定影响。同时,采用上位机、下位机的方法,虽然提高了机器人控制系统的可扩展性和复用性等,但这种主控式的方法无法完成机器人功能的动态配置与在线重构。

近年来,在软计算、智能化领域中,“软件人”是发展较快的研究方向。从理论构造和实现来说,它是软件领域中“智体”(Agent)和“对象”的升华,是将人工生命、人工社会研究方法与现有 Agent 研究成果结合起来的网络世界中的虚拟机器人,学习与进化特征是其区别于 Agent 的关键。与通常的 Agent 相比,它更富有“人工生命”的特性和活性,尤其是具有拟人的智能和情感,能够模拟人的功能和行为,并能扩展和延伸人的行为,代理人类置身、穿梭于各种计算机网络和软件世界;同时,“软件人”具有拟人的自主性、主动性,可根据任务需求、环境的变化,自主决策产生行为意图,主动为用户提供个性化服务。前人在微型计算机上已经成功构造出“软件人”系统。本书提出“软件人”与机器人合一机制,将“软件人”的拟人功能和拟人行为融入机器人控制系统,构建一种新的机器人嵌入式系统体系结构。机器人系统与“软件人”系统的融合——“合一系统”的思想如下:针对机器人控制平台封闭式结构的局限性,将“软件人”引入机器人控制系统,构造以宿主“软件人”为信息处理和管理守护中心、附体“软件人”为机器人功能控制中心、机器人为传感载体和末端执行机构的平台,构建开放的分布式体系结构,在机器人与微型计算机之间构造对等、柔性、动态的协同模式,实现对机器人功能的动态配置与在线重构,进一步提升机器人系统的柔性智能能力,改善其环境的适应协调能力。

本书在“软件人”及其系统研究成果与实现技术的基础上,将宿主“软件人”和附体“软件人”引入机器人系统,给出一种“软件人”与机器人合一的技术解决方案,旨在解决现有机器人控制系统封闭、可扩展性差的问题。本书适合从事计算机科学、控制科学、智能科学及相关领域科学研究人员和工程应用人员使用,也可供计算机、自动化、智能科学等相关专业师生参考。

本书共 11 章,第 1 章和第 2 章由曾广平执笔,主要介绍“软件人”系统与机器人控制系统合一机制的总体设计;第 3 章和第 4 章由肖超恩执笔,主要介绍守护“软件人”和消息“软件人”的构造原理与技术;第 5~11 章由张青川执笔,主要介绍管理“软件人”、功能“软件人”、宿主“软件人”和附体“软件人”的构造原理与技术,以及合一系统简介。

武丹凤博士、钱兆鹏博士和毕铭文硕士对本书撰写做出了重要贡献,在此对他们的辛勤付出表示诚挚的谢意!

本书的写作和出版得到 2017 年度北京工商大学青年教师科研启动基金项目(No. QNJJ2017-16)的支持和资助,特此致谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2018 年 6 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大系统控制论	2
1.1.1 广义知识表达方法	2
1.1.2 大系统协调控制理论	3
1.2 开放式机器人系统	3
1.3 “软件人”相关理论综述	5
1.3.1 “软件人”的概念模型	5
1.3.2 “软件人”个体构造原型	6
1.4 博弈论	7
1.5 本章小结	8
第 2 章 “软件人”与机器人合一系统的总体设计	9
2.1 合一系统的体系结构框架	10
2.2 合一机制下机器人平台体系结构	12
2.2.1 宿主“软件人”对机器人系统的构造	13
2.2.2 宿主“软件人”管理守护机制的建立	13
2.2.3 合一机制下“软件人”平台的扩展	14
2.3 本章小结	14
第 3 章 守护“软件人”的构造原理与技术	15
3.1 守护“软件人”的启动	16
3.1.1 守护“软件人”初始化流程	16

3.1.2 守护“软件人”初始化语言	19
3.2 守护“软件人”创建行为	22
3.3 守护“软件人”容错机制	25
3.3.1 “软件人”重新启动	25
3.3.2 检查点容错机制	27
3.4 守护“软件人”对任务部署的支持	30
3.4.1 守护“软件人”任务系统部署框架	30
3.4.2 “软件人”任务系统部署描述语言	31
3.4.3 基于 QoS 的部署规划	33
3.4.4 分布式并行部署实施	35
3.5 本章小结	37
第 4 章 消息“软件人”的构造原理与技术	39
4.1 分布式“软件人”系统通信框架	40
4.2 消息“软件人”通信信道建立行为	43
4.2.1 “软件人”通信协议栈	43
4.2.2 “软件人”通信信道	45
4.3 消息“软件人”的命名服务行为	49
4.3.1 消息“软件人”的命名与定位	49
4.3.2 消息“软件人”消息转发机制	51
4.3.3 消息“软件人”通知消息	55
4.4 本章小结	56
第 5 章 管理“软件人”的构造原理与技术	57
5.1 “软件人”系统中的知识模型	58
5.2 管理“软件人”知识模型	59
5.3 管理“软件人”行为规范	61
5.3.1 SM.man 对 SM.fun 的行为控制	61

5.3.2 环境资源感知行为	65
5.3.3 决策规则推理行为	66
5.3.4 社区任务管理行为	67
5.4 基于 SOECAP 模型的决策推理	69
5.4.1 SOECAP 规则模型	70
5.4.2 规则冲突问题描述	72
5.4.3 SOECAP 规则冲突检测	73
5.4.4 SOECAP 规则冲突消解	74
5.4.5 系统管理规则的优化与生成	76
5.5 本章小结	78
第 6 章 功能“软件人”的构造原理与技术	79
6.1 功能“软件人”知识模型	80
6.2 功能“软件人”行为规范	82
6.2.1 功能“软件人”服务行为规范	82
6.2.2 功能“软件人”任务行为规范	83
6.3 基于知识表示的“软件人”交互	88
6.3.1 “软件人”通信语言的格式	89
6.3.2 “软件人”通信原语	89
6.3.3 “软件人”通信语言内容	91
6.4 本章小结	93
第 7 章 宿主“软件人”的构造原理与技术	95
7.1 宿主“软件人”知行模型	96
7.1.1 “软件人”知行模型定义	97
7.1.2 “软件人”知识行为一体化描述	98
7.2 宿主“软件人”体系结构设计	100
7.3 宿主“软件人”知识行为一体化描述模型	102

7.4 宿主“软件人”服务行为描述	104
7.4.1 系统初始化行为	105
7.4.2 通信信道建立行为	105
7.4.3 迁移接收行为	106
7.4.4 硬件抽象层服务行为	107
7.4.5 节点容错机制	109
7.4.6 对附体“软件人”的控制行为	110
7.4.7 环境资源感知行为	111
7.5 宿主“软件人”的实现技术	112
7.5.1 宿主“软件人”知识模型实现	112
7.5.2 宿主“软件人”服务行为实现	115
7.6 本章小结	118
第8章 附体“软件人”的构造原理与技术	119
8.1 附体“软件人”体系结构设计	120
8.2 附体“软件人”知识行为一体化描述模型	121
8.3 附体“软件人”行为描述	123
8.3.1 附体“软件人”服务行为描述	123
8.3.2 附体“软件人”任务行为描述	124
8.4 基于知行模型的“软件人”知识通信	126
8.4.1 层次结构	126
8.4.2 层次结构设计	127
8.5 附体“软件人”的实现技术	131
8.5.1 附体“软件人”知识模型实现	131
8.5.2 附体“软件人”的加载与解析	133
8.5.3 附体“软件人”的迁移	135
8.6 本章小结	137

第 9 章 合一系统中多任务的动态分配	139
9.1 任务描述与分解	140
9.1.1 任务描述	140
9.1.2 任务分解	142
9.2 动态任务协调分配机制与算法	145
9.2.1 多任务争用冲突资源分配模型	146
9.2.2 资源需求长度计算算法	147
9.3 资源权重的自适应调整方法	148
9.4 本章小结	151
第 10 章 合一系统中“软件人”群体协作的实现与应用	153
10.1 基于树莓派的移动机器人控制系统搭建	154
10.2 移动机器人与服务器间通信机制的实现	156
10.3 协作算法实现	161
10.4 “软件人”群体协作机制的性能评测	164
10.5 本章小结	166
第 11 章 结论	167
参考文献	169

第1章 绪 论

本章概述性地阐述与“软件人”和机器人合一系统相关知识领域的研究现状,主要包括大系统控制论、开放式机器人系统、“软件人”相关理论和博弈论。

1.1 大系统控制论

大系统理论^[1,2]是钱学森教授等发起研究的系统科学新领域,其主要特点包括:①系统由大量的子系统组成,系统的目标多样且有难以量化的定性目标,功能综合的各子系统之间关联复杂、层次极多;②系统本身与周围环境之间有信息、物质和能量的交换,以及与决策者意向的交换,系统中子系统的结构随着系统的演变而变化,并且人的经验知识和意向对系统的作用显著^[3]。事实上,人们在认识和改造客观世界中遇到的大量现象是不确定性现象,因为许多现象的产生具有随机性,而人们对这些现象的认识又带有模糊性,因此,普遍研究认为随机性和模糊性是系统科学研究中不确定性的两大主要表现形式。李德毅院士在《不确定性人工智能》^[4]一书中提出一种研究不确定性的智能模型——云模型,为今后系统科学的不确定性研究提供了有价值的参考。

北京科技大学涂序彦教授基于人工智能与大系统理论^[5~7]等,开展了大系统控制论的研究^[8~10],并于1994年出版《大系统控制论》^[11]一书,2005年再版^[12]。

大系统控制论是控制论向广度发展的新分支,是研究复杂大系统广义控制及大型、复杂、广义控制系统的建模、分析与设计的理论、方法和技术的新科学,它研究各种不同领域复杂大系统的控制机理,以及信息过程的共同规律与相互渗透。大系统控制论通过对系统的广义模型化(如智能化模型、多层状态空间模型、多重广义算子模型),对大系统结构特征、结构变形、进化及结构的可控性、协调性等进行分析和综合,并提出了系统控制、最经济控制、智能控制等针对大系统复杂特质的控制理论及方法。下面简要介绍广义控制中的广义知识表达方法和大系统协调控制理论。

1.1.1 广义知识表达方法

为了拓广人工智能与知识工程中常用的知识表达方法,本书作者提出面向大系统的广义知识表达方法,给出大系统的两种广义模型,即广义知识表达树与广义知识表达网。

广义知识表达树由广义节点、广义树枝、杂交节点及杂交树枝四部分组成。广义节点可表达各种知识体;广义树枝用于表达同一棵表达树中各广义节点之

间的关系,主要表达父节点与子节点之间的上下级关系及分叉关系;杂交节点及其树枝用于联系两棵或多棵广义知识表达树,构成“广义知识表达树林”,以便表达多学科、多专业的复杂知识体系。杂交树枝(用虚线表示)用于连接杂交节点与相应的广义节点,这些广义节点分别属于不同的广义知识表达树。这表示该杂交节点表达的杂交知识体,是相应的两个广义节点表达的知识体进行杂交的结果,可以生成广义知识表达树、广义知识表达树林。应用这种由知识模型、数学模型、结构模型组成的集成模型,可以表达多学科、多层次、多类型的复杂领域知识,设计、建造大型知识库及知识工程系统。

广义知识表达网是广义知识表达树的拓宽与扩展。广义知识表达树可以嵌入广义知识表达网中,当某一领域知识体系具有树形结构时,其广义知识表达网也就是广义知识表达树。广义知识表达网也是由知识模型、数学模型、结构模型组成的集成模型,可用于表达现实世界真实系统的多学科、多层次、多类型的复杂领域知识。广义知识表达网比广义知识表达树更灵活,适用领域更广。

1.1.2 大系统协调控制理论

将多变量协调控制原理拓广到递阶大系统与分散大系统,分析人体大系统的协调控制机制与经济大系统的协调控制策略。

递阶大系统协调控制的典型策略包括:

- (1) “分解—协调”二步法。
- (2) “化整为零”“合零为整”两级优化。
- (3) 子系统局部优化→大系统全局优化。

分散大系统协调控制的典型策略包括:

- (1) 导引协调。
- (2) 循环协调。
- (3) 分组协调。
- (4) 全息协调。

1.2 开放式机器人系统

从体系结构来看,机器人控制系统通常分为专用/封闭控制系统、开放式控制系统和混合型控制系统三类。近年来,随着网络化需求的规模扩大与需要解决问题的复杂化,由用户根据实际需要进行替换和修改的完全开放的机器人控制系统逐渐成了人们的追求目标^[13,14]。

国内外学者纷纷开始了对开放式机器人控制系统的研究。相对于封闭式机器人控制系统而言,开放式机器人控制系统的优势主要体现在以下三个方面:第一,可扩展性强,机器人控制系统可以通过集成新的硬件或软件模块,扩展其系统功能;第二,可重构性高,用户可以根据实际情况对机器人控制系统的功能和行为进行调整和重构,以适应新的需求;第三,软件可移植性好,通过标准化的控制平台、操作系统和用户接口的设计,使软件逻辑摆脱具体硬件结构的束缚,可以便捷地进行移植和复用。

接下来简要介绍开放式机器人的发展及现状^[15~17]。

很多学者在机器人控制系统的研究中提出了尽可能模块化、分层的思想,并对分解的模块或层的外部行为给出简单的接口,以屏蔽简化内部行为。Nagoya大学的T. Fukuda等人开发了一个分散、分层的分布式自重构机器人系统CEBOT^[18,19]。R. Hui等人提出了一种模块化、可重构、可扩展的机器人系统IRIS^[20]。M. Fujita等人基于Sony公司的OPEN-R标准开发了一个针对玩具业应用的可重构机器人平台^[21]。T. Matumaru提出了由关节模块、连杆模块和操纵杆控制单元组成的TOMMS系统^[22]。G. J. Hamlin和A. C. Sanderson提出了名为Tetrobot的可重构模块机器人系统,并成功构建了几类可重构模块机器人系统^[23]。

近年来,机器人系统的开放可重构研究在国际上受到了极大的重视。Cornell University的Zykov V.等人从物理运动学理论的角度证明了任意尺寸自重构机器人的存在,并于2005年设计了Molecubes模块化机器人^[24]。Goran Ferenc等人提出了一种基于CORBA协议的分布式机器人实时控制系统^[25]。MIT的Gilpin K.等人于2006年设计了Miche晶格式模块化机器人,实现了机器人任意形状的组建^[26]。Sachiko Nakagawa等人提出一种分布式服务框架,通过机器人服务网络协议,使包括机器人在内的各种设备与互联网服务整合在一起^[27]。EPFL的Sprowitz A.等人基于未来智能家具的设想,于2009年搭建了Roombot模块化机器人平台^[28]。White等人对刚性连接的模块化结构进行抽象处理,并用非线性特性的刚度矩阵表示模块之间的连接处^[29]。Ernesto等人对应用在可重构制造系统中的四自由度机器人加工机械手进行概念设计、建模和比例微分的控制^[30]。

虽然国内对机器人系统的研究起步相对较晚,但在开放可重构机器人研究方面也取得了一定的成果。郑浩俊提出了一种新的可重构机器人单元结构模型和非同构树状拓扑结构^[31]。姜勇等人针对模块化可重构机器人构形的特点,提出一种上层数据库与底层接口电路相结合的构形在线自主辨识方法^[32]。吴向阳等人提出一种分布式机器人控制器的体系结构,采用以太网作为系统总线,通过统一的通信协议实现从Internet到设备底层的无缝连接^[33]。刘明尧等人提

出一种基于多 Agent 的机器人控制方法^[34]。王明辉等人使用 CAN 总线技术作为模块之间主要的通信方式,设计了新型可重构星球探测机器人模块化控制系统^[35]。陶建国等人基于可重构概念,设计了一种新型两轮驱动的轮臂式漫游机器人本体^[36]。李树军等人对可重构模块化机器人模块的结构进行了研究^[37]。张玉华等人提出了一种新型模块化可重构机器人 HitMSR 系统的硬件和软件系统实现方案^[38]。蔡自兴等人以异构多 Agent 系统(MAS)理论为基础,提出一种可在多个层次上动态重构的控制系统设计方案^[39]。王永骥等人针对移动机器人软件环境,提出把软件构件的思想应用在机器人系统中,实现了移动机器人对运动目标的跟踪任务^[40]。

1.3 “软件人”相关理论综述

2002 年,北京科技大学的涂序彦教授、曾广平教授从广义人工生命的观点出发,提出能够模拟、延伸、扩展人的行为和功能的软件实体——“软件人”(SoftMan, SM)理论。“软件人”融合了分布式人工智能、迁移计算、并行分布式系统、移动智体和人工生命等理论与方法,是基于软件技术,活动于计算机网络,具有拟人活性与行为,能代替人们进入软件世界从事信息采集、传输、处理和加工的自动软件工具。“软件人”是智体、数字生命、虚拟人、网络化身、游戏角色等概念在共性集成基础上的升华,具有更加全面的拟人智能、拟人结构、拟人功能、拟人情感、拟人遗传、拟人进化等“拟人化”的内在属性和外部行为^[41]。

1.3.1 “软件人”的概念模型

“软件人”概念模型^[42]可用下列四元组表示:

$$S_M = \{A, F, D, S\}$$

式中, A 为拟人属性, $A = \{\text{Auto}, \text{Aancti}, \text{Asens}, \text{Areac}, \text{Amobi}, \text{Asoci}\}$, 即自主性、主动性、敏感性、反应性、机动性和社会性等; F 为拟人功能, $F = \{F_1, F_o, F_w\}$, 即学习功能、组织功能、工作功能等; D 为拟人行为, $D = \{\text{Devol}, \text{Dgene}, \text{Dacti}\}$, 即拟人进化、拟人繁殖和拟人活动等; S 为拟人结构, $S = \{S_b, S_f, S_a\}$, 即拟人脑(脑模型)、拟人感觉器官、拟人效应器官等。

A 、 F 、 D 、 S 均为集合, 它们的元素是相应对象的集合。例如, F 中的 F_w 是“软件人”的工作功能集合, $F_w = (W_i | i=1, 2, 3, \dots, N)$, N 为“软件人”定义和实现的工作功能数; 又如, S 中的 S_b 是拟人脑功能结构(脑模型)元素的集合等。

从系统角度出发,“软件人”生存和活动于网络环境中,环境因素集合 E 则是“软件人系统”的组成部分,所以“软件人系统”(SoftMan System, SMS)概念模型表示为 $S_{MS}=\{\{A,F,D,S\},E\}$ 。

作为一个“活体”,“软件人”表现出来的是“行为”。“行为”的启动、延续和停止就是“软件人”在网络时空中的活动轨迹。其状态 $V_i=\{[\text{状态集合}], \text{初态}, [\text{激发条件}]\}$,是刻画“软件人”活动的重要因素。

因此,“软件人”系统的活动状态模型可用如下导出的六元组表示:

$$S_{MS, act} = \{S_{MS}, V_i\} = \{S_M, E, V_i\} = \{A, F, D, S, E, V_i\}$$

1.3.2 “软件人”个体构造原型

“软件人”个体构造原型由三部分组成:本体构造、行为构造和接口构造。

(1)“软件人”的本体结构包括虚拟脑、虚拟眼、虚拟耳、虚拟嘴、虚拟手、虚拟脚等。这些器官是本体之下的属体,其功能简要描述如下^[43]。

虚拟脑 (Virtual Brain): 由四个部分组成,一是记忆部分;二是推理运算部分;三是脑信息的出入接口;四是脑决策后实施的指挥中枢,它指挥其他属体如何行动。前两个部分合作形成思维。

虚拟眼 (Virtual Eyes): 在网络或本地环境中查看和寻找指定的对象(客体)。

虚拟耳 (Virtual Ears): 倾听网络或本地环境中 SM 的对话信息,为下一步行动提供前提条件。

虚拟嘴 (Virtual Mouth): 实现远程或本地环境中 SM 与 SM,以及 SM 与人的信息沟通。

虚拟手 (Virtual Hands): 实现 SM 的服务功能,功能由用户定义,且与进化/继承及 SM 的类型有关。

虚拟脚 (Virtual Feet): 实现 SM 在网络环境中的自由迁移,分为进程迁移和文件迁移两种形式。

(2)除用户定义的规范功能外,“软件人”的行为构造则表现其独立的“人格”和个性,是自然而然的行为,也是“软件人”心理、偏好和思维趋向的体现,主要包括睡眠、闲逛、夭折、老死等。

(3)“软件人”的接口构造^[44]是“软件人”通信模型的主要技术部分,限于篇幅,这里不再赘述。“软件人”的构造着力于本体和属体的功能实现。