

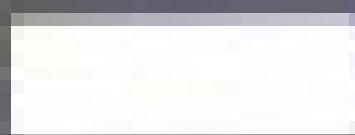
多智能体系统及应用

高阳 安波 陈小平 毛新军 主编

清华大学出版社

世界經濟學原理(第三版)

第三版 馬克思主義經濟學原理



多智能体系统及应用

高阳 安波 陈小平 毛新军 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

多智能体和多智能体技术是人工智能领域活跃的研究分支。本书在 2014 年度“中国智能体及多智能体系统”研讨会的基础上结集而成,全书共分 12 章,各章主题均是智能体领域的重点及热点问题,分别涉及智能体逻辑、一致性控制、拍卖、博弈论、复杂网络和自适应软件等。

本书可供高等院校、科研院所计算机、自动化及相关专业的师生、科技工作者及相关企业的工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121993

图书在版编目(CIP)数据

多智能体系统及应用/高阳等主编. —北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-40252-7

I. ①多… II. ①高… III. ①人工智能—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 106331 号

责任编辑:薛 慧

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.25 字 数:393 千字

版 次:2015 年 7 月第 1 版 印 次:2015 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:48.00 元

产品编号:063372-01

前 言

智能体和多智能体技术起源于分布式人工智能研究。自 20 世纪 80 年代末,该方向成为人工智能领域活跃的研究分支,与数学、控制、经济学、社会学等多个领域相互借鉴和融合,逐渐成为国际上备受重视的研究领域之一。国际学术界陆续创办了面向智能体和多智能体技术的专门国际学术期刊 *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 和学术会议 The International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems。除此之外,在相关国际学术期刊(如 *Artificial Intelligence*)和会议(如 IJCAI 和 AAAI)上,智能体和多智能体的研究论文仍然占据了非常重要的地位。自 20 世纪 90 年代,中国学者即开始相关技术的跟踪和原创研究。其中以清华大学、中国科学院计算技术研究所等研究机构为代表,都取得了很好的研究成果。

2006 年,中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会发起组织了“第一届 Agent 理论与应用学术会议”,特别关注和推动中国学术界智能体技术的研究和发展。是年 8 月,首届会议在烟台大学成功举办。其后,该系列会议每两年组织一次。至 2012 年,分别在南京大学、国防科技大学和吉林大学举办了三届。历次会议均有 100 余人参会。

中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会从 2013 年起举办两年一度的“中国计算机学会人工智能会议(CCF-AI)”,“Agent 理论与应用学术会议”暂停举办。2014 年 3 月初,为了进一步推动中国智能体和多智能体技术的发展,在中国科学院计算技术研究所举办了新形式的“中国智能体及多智能体系统”研讨会,由史忠植研究员、安波副研究员主持。会议采用了不征文、不收费、报告人由组织者邀请的新方式。此次研讨会邀请了清华大学、中国科学技术大学、微软亚洲研究院等 15 位专家与会做了报告。研讨会促进了国内智能体技术领域学者的交流。会中,与会者一致同意在中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会指导下,申请成立“多智能体与智能系统学组”。后经中国计算机学会同意,在中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会下正式成立该学组,并决定每年举行“中国智能体及多智能体系统”研讨会。

本书是 2014 年度“中国智能体及多智能体系统”研讨会的一部分专家将其报告内容总结成文而得的文集。书中每一章讨论一个技术主题或者应用,兼顾该主题的综述和报告人自身的研究成果。书中章节涉及智能体逻辑、一致性控制、拍卖、博弈论、复杂网络和自适应软件,内容广泛。章节内容既有传统人工智能学者的研究进展,也有软件工程学者的最新工作;不仅有从计算机科学视角的讨论,也有控制等其他学科的观点。本书的出版得到了中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会的支持和指导,在此谨表示衷心的感谢。

编 者

2015 年 5 月

目 录

智能体 ABGP 模型和协同	史忠植, 张建华, 马 刚, 杨 熙(1)
1 概述	(1)
2 智能体 ABGP 模型	(2)
3 策略驱动	(5)
4 联合意图	(7)
5 结束语	(12)
参考文献	(12)
多智能体系统的一致性控制: 基于采样协议的情形	刘会央, 谢广明(14)
1 预备知识	(15)
2 单积分器系统	(16)
3 双积分器系统	(23)
4 仿真例子	(34)
参考文献	(36)
多智能体系统的描述、自动验证与自动修正	吴 骏, 王崇骏, 谢俊元(37)
1 引言	(37)
2 多智能体系统的状态转换模型	(38)
3 合作逻辑	(41)
4 自动验证	(45)
5 自动修正	(49)
6 总结与展望	(55)
参考文献	(56)
多智能体与社会网络	蒋焱川(60)
1 引言	(60)
2 基于多智能体的社会网络模型	(60)
3 满足社会网络结构约束的多智能体行为决策	(67)
4 社会网络结构化多智能体系统的任务分配	(82)
参考文献	(96)

网络结构分析与多智能体系统研究	杨 博(98)
1 网络结构分析的研究背景	(98)
2 网络结构分析的主要进展	(99)
3 网络分析与多智能体系统研究	(103)
4 多元结构发现方法	(105)
5 基于自组织自适应多智能体的社区发现方法	(111)
6 基于自治计算的流行病传播网络建模与推断方法	(119)
7 网络分析与多智能体系统结合研究的展望	(124)
参考文献	(125)
搜索广告拍卖机制设计的新进展	陈 薇,秦 涛,马卫东,刘铁岩(128)
1 搜索广告简介	(128)
2 广义二价拍卖机制	(129)
3 从精确匹配机制到广义匹配机制	(132)
4 从独立价值模型到非独立价值模型	(138)
5 基于博弈机器学习技术的拍卖机制优化	(142)
6 小结	(147)
参考文献	(147)
双边拍卖市场中交易者报价策略和市场收费策略的博弈论分析	石 兵(149)
1 引言	(149)
2 相关工作	(150)
3 博弈论模型	(151)
4 Fictitious Play 算法	(153)
5 实验分析	(155)
6 总结	(159)
参考文献	(159)
博弈论用于安全资源的分配与调度	安 波(161)
1 安全领域的资源分配及博弈模型	(161)
2 安全博弈论的成功应用	(162)
3 保护公共活动	(165)
4 研究挑战	(168)
5 未来应用	(170)
参考文献	(170)
基于 MAS 的人工社会突发事件应急管理方法	唐明圣,毛新军(172)
1 引言	(172)

2 面向应急管理的 PZE 方法	(174)
3 基于智能体的人工社会建模	(175)
4 面向突发事件的应急管理政策制定与评估	(181)
5 实验	(183)
6 总结	(191)
参考文献	(192)
多智能体与自适应软件	刘 璘(194)
1 软件自适应机制	(194)
2 多智能体系统	(197)
3 一个基于多智能体的软件服务自适应与监控系统	(200)
4 小结	(209)
参考文献	(210)
基于多智能体的软件集成开发与演化方法	李青山(211)
1 面向智能体的软件工程方法学	(211)
2 基于多智能体软件集成开发与演化体系结构	(229)
3 基于多智能体开发与演化关键技术	(233)
4 软件动态集成演化平台与工具	(247)
5 总结	(254)
参考文献	(254)
无中心式大规模多智能体系统知识共享方法	徐 杨, 王晓峰(257)
1 引言	(257)
2 分布式知识共享模型	(258)
3 知识共享算法	(259)
4 智能体局部知识的共享	(261)
5 实验设计与分析	(261)
参考文献	(264)

智能体 ABGP 模型和协同

史忠植, 张建华, 马 刚, 杨 熙

中国科学院 智能信息处理重点实验室, 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190

1 概述

在计算机和人工智能领域中, 智能体(agent, 又称主体)可以看作一个实体, 它通过传感器感知环境, 通过效应器作用于环境。若智能体是人, 则传感器有眼睛、耳朵和其他器官, 手、腿、嘴和身体的其他部分是效应器。若智能体是机器人, 摄像机等是传感器, 各种运动部件是效应器。一般智能体可以用图 1 表示。

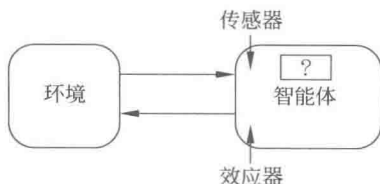


图 1 智能体与环境交互作用

1987 年 Bratman^[4]从哲学的层面讨论了信念、愿望、意图、时间与行为的关系, 认为它们在所期望的行为选择方面发挥着重要的作用。许多研究者使用不同的方法对该理论进行了形式化, 这些方法主要有三种:

- (1) 以分支时态逻辑为基础的方法;
- (2) 以线性时态逻辑为基础的方法;
- (3) 以命题动态逻辑为基础的方法。

1991 年, Rao 和 Georgeff^[12]以分支时间时态逻辑为基础建立的 BDI 逻辑系统, 引入了信念、目标(愿望)和意图这三个模态算子, 借助可能世界语义学, 为这些算子建立克里普克模型; 在对不同类型的智能体进行形式化分析时, 通过加入特定的条件以保持智能体的信念、目标和意图的持续性。

Bratman 的理论被 Cohen 和 Levesque 进行了形式化。Cohen 和 Levesque^[5]在线性时态逻辑中, 添加表示信念、目标的算子和一些其他算子。他们的理论主要探讨了信念、时间对行为的影响, 对愿望的概念有所忽略; 但引入了“现实偏好”。1995 年, van Linder 等人^[11]提出的 KARO 逻辑, 在命题动态逻辑的基础上增加知识、信念和愿望, 对 Bratman 提出的 BDI 方法进行逻辑刻画。

在开放和分布的环境中, 一个理性智能体的行为受制于意图。意图又表现为:

- (1) 一个智能体要改变自己已有的意图必须要有理由;
- (2) 一个智能体不能无视环境的变化而坚持不符合实际或已不重要的意图。

理性平衡的目的在于使理性智能体的行为符合环境的特性。所谓环境特性不仅仅指环境的客观条件,同时包含环境中的社会团体因素,如社会团体关于理性行为的判断法则。Bratman 给出了意图-行为原则:如果智能体 A 有进行行为 B 的当前行为意图是合理的,那么 A 把意图转化为行为,有意地进行行为 B 就是合理的。在给定时间里,智能体理性表现为:

- (1) 性能测度规定成功的程度。
- (2) 智能体感知所有事情,我们将这个完整的感知历史称为感知序列。
- (3) 智能体知道环境是什么。
- (4) 智能体可以执行的动作。

一种理想的理性智能体可以定义为:对于每种可能的感知序列,理想的理性智能体,在感知序列所提供的证据和智能体内部知识的基础上,应该做的所期望的动作是使它的性能测度为最大。

在多智能体系统中,由于智能体间动作的相关性、单个智能体能力的有限性、资源的分布性,以及为了满足全局性约束,智能体间进行联合工作实现问题求解是必须的。协同是一个过程,通过它能看到一个问题的不同方面,各方能够建设性地探索相互之间的分歧,并搜索其超越自己能力的解决方案。

文献[6]介绍了协作解决问题和混合主动规划。然而,这些模型更注重信念状态和推理的形式方面,而不是智能体的行为。其他研究,如 COLLAGEN^[13]和 RavenClaw^[3]专注于任务执行,但没有规划的显式模型,并缺乏沟通。系统 PLOW^[2]定义了可以学习和执行新任务的智能体,但 PLOW 智能体是在程序中定义,使其难以推广到其他形式的问题求解行为。文献[7]建立认知模型的理论,考虑协同行为,包括规划和沟通,并对其中的任务采用陈述性表示,支持内省和新行为的学习,但只侧重于智能体的内部心理状态,并没有考虑环境状况。

在多智能体系统中,群体感知认识其他活动,并提供自己语境相关的活动。群体感知的基本问题可以分为谁是合作者,他们在做什么,以及他们在什么地方做^[8]。当合作者可以很容易地收集信息来回答这些问题时,他们能够简化其语言交流,能够更好地组织自己的行为 and 预期彼此的行动,并能更好地相互协助。

本文提出了 ABGP 智能体模型,该模型能更好地反映智能体外部感知和内部心理状态。协同工作是多智能体的一个进行感知、目标选择、规划和执行的永无止境的循环过程。

2 智能体 ABGP 模型

由于单个智能体的能力有限,面对复杂的任务,需要多个智能体协作完成。各个智能体的协同合作,大大提高了整个系统的性能。其中,每个智能体需要不断地与其他智能体进行通信,且每个智能体还需要与外部环境进行交互。我们扩展基本的智能体 BDI 模型,提出了智能体 ABGP(Awareness-Belief-Goal-Plan)模型。ABGP 模块主要由 4 部分构成:环境感知、信念、愿望和规划。

2.1 环境感知

环境感知是智能体在与环境交互的过程中所生成的知识。Gutwin 等人^[8]提出了环境感知工作空间的概念框架,用来对一组智能体同外部的环境交互进行建模。作者在该文中列举了智能体环境感知概念框架中需要感知的元素。工作空间环境感知的信息通过对这些元素的组合而构成。

多智能体感知应该考虑到基本因素和智能体之间的关系。多智能体的环境感知可以定义为一个二元组 $MA = \{\text{元素}, \text{关系}\}$,其中环境感知的元素主要包括:

- 身份(角色): 谁是参加者;
- 地点: 他们的位置参数;
- 意图: 多智能体打算做什么,他们的目标;
- 动作: 他们在做什么,针对需要实现的目标,智能体需要对外部产生自己的动作;
- 能力: 智能体可以做什么呢? 有时,不同的智能体具有不同的功能,因此,需要对外公布自身所具有的能力;
- 目标: 智能体需要达到什么样的目标;
- 时间点: 当智能体需要对外部环境产生动作时,需要一个时间点,确定该时间点,智能体才能对外部环境进行动作。

智能体之间的基本关系主要有:

- 任务关系: 任务关系涉及到任务的划分。有时,单独的一个智能体受限于自身能力,并不能够完全将任务完成。为此,我们需要将大的任务划分为较小的任务,这样通过分布式协作,最终将大的任务完成。
- 角色关系: 当任务划分到具体的智能体时,还要考虑到不同智能体自身的属性。由于智能体属性各有不同,在分工的时候,我们需对其进行考虑,尽量让每个智能体去做自己擅长的工作。角色关系定义了多智能体在合作过程中的角色关系。
- 操作关系: 操作关系定义了多智能体在合作过程中操作的集合。
- 活动关系: 活动关系定义了多智能体在合作过程中,在相应时间内智能体的角色。
- 合作关系: 合作关系定义了智能体相互之间的交互。

2.2 信念

信念代表了一种信息,该信息一部分可以从其所处的环境中获得,一部分从自身的内部产生。这些信息构成了智能体自身的知识库。我们通常把信念看作智能体的一个知识库,这个知识库中包含丰富的内容,主要有基本公理、客观事实、客观数据等。

信念知识可以看作一个三元组 $K = \langle T, S, B \rangle$ 。 T 描述了领域内基本的概念和它们的定义,以及从领域内的概念中所产生的公理,即领域本体; S 是领域中的事实和公理的对应关系,在这些限制中,存在着一定的因果关系。这些限制保证了知识库的一致性和完整性; B 用来表示当前的信念状态集合,包含了事实和数据。随着时间的推移,智能体外部的环境和智能体自身的状态发生改变, B 中的内容也在动态地发生改变。

2.3 目标

目标表示智能体的愿望,同时目标也驱动智能体产生动作,作用于外部环境。随着时间的推移,智能体会有很多愿望。但是这些愿望之间有时是一致的,有时是自相矛盾的。为此,智能体有一个慎思处理,将所有的愿望统一为一致的愿望。对于智能体内部有冲突的愿望,按照系统中所拥有的算法,将其从愿望集合中剔除。在一个基于目标的设计中,目标具有不同的类型。有的目标是维持型的,即该目标主要是为了维护系统的某种特定状态。有的目标是实现型的,该目标系统以前并没有达到,需要智能体根据现有状态,向外部环境输出自己的动作,从而达到自己所期望的目的。目标的状态,允许我们在对智能体进行建模的时候,有多重处理方式。智能体不仅仅是被动地反映外部环境,即外部环境发生变化时,智能体为了维持自身的平衡,采取一系列动作。智能体还可以不受外部环境的影响,主动地去完成一些目标。智能体中的目标需要生成,主要有如下三种目标生成方式:

- (1) 系统设计者在设计系统时确定或是在系统初始化时选定目标;
- (2) 随着环境的动态变化,为了响应环境的变化产生目标;
- (3) 智能体内部产生目标。

2.4 规划

当一个目标被选择后,智能体必须选择一个有效途径到达该目标,甚至有的时候需要修改现在正在运行的目标,这个推理的过程称为规划。为了完成这个推理过程,智能体可以采用两种方式:一种是采用智能体内部已有的规划库,这个库中包含有许多已经定制好的规则,这样的库我们称其为静态库;另一种是进行及时的规划,不采用静态数据库中的知识,我们称其为动态规划。静态规划用来处理某些特定目标。预先设置的目标可以通过查询静态库,从而从该库中得到相应的动作支撑,达到目标。静态库中的规则已经给定,因此,对于需要达到的目标,此时的问题转化为搜索问题。对于特定目标,动态规划需要找到一条有效途径来实现,这时需要考虑当前的信念,但是并不应用系统内部的静态知识库。在动态规划过程中,自然环境一直进行着动态变化,因而,信念状态也伴随着动态地变化。即使对于相同的目标,由于所处环境状态的不同,规划和实现的方式也会有差别。因此,动态规划对于智能体来说是十分必要的,尤其是对于多智能体协作的复杂环境。在动态规划方式下,我们采用由顶到下的方式。在这种方式下,一个目标包含一系列子目标。因此,要实现一个目标,首先需实现一系列子目标。只有在所有子目标都实现的情况下目标才算最终实现。

2.5 智能体系统结构

具有 ABGP 模型的智能体可以通过下列要素描述(具体地如图 2 所示):

- (1) 一组感知的外界环境;
- (2) 一组关于世界的信念;
- (3) 智能体当前打算达到的一组目标;

- (4) 一个规划库,描述如何达到目标和如何改变信念;
- (5) 一个意图结构,描述智能体当前如何达到其目标和改变信念。

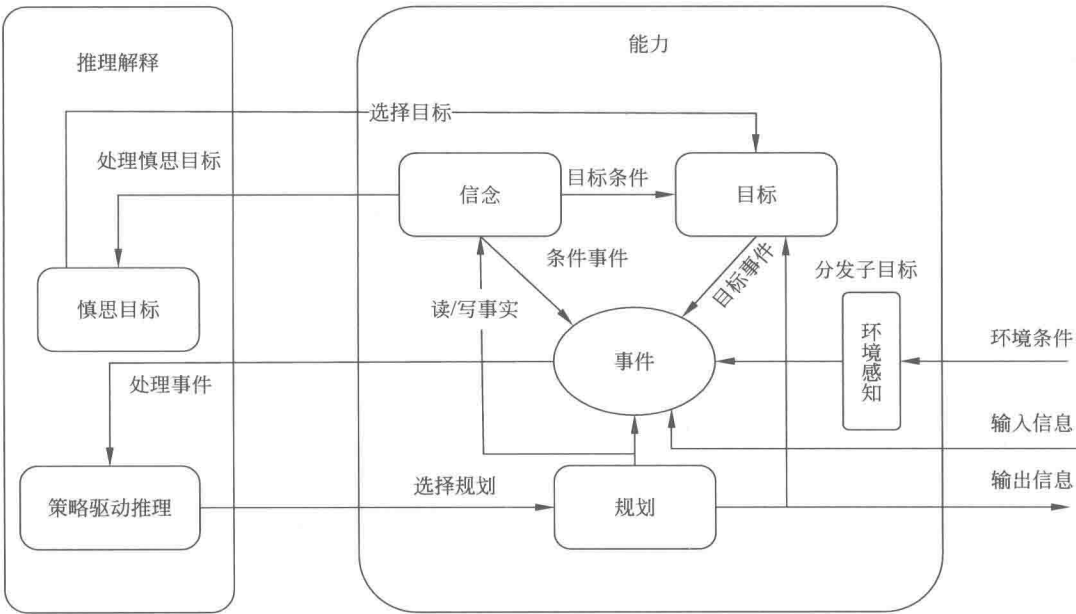


图 2 具有 ABGP 模型的智能体系统结构

智能体 ABGP 解释器具有如下核心程序：

```
ABGP-interpreter
  initialize-state();
  repeat
    get-new-events-from-awareness();
    get-new-events-from-ACL-communication();
    options := option-generator(event-queue);
    selected-options := deliberate(options);
    update-plans(selected-options);
    execute();;
    drop-successful-attitudes();
    drop-impossible-attitudes();
  end repeat
```

3 策略驱动

关于策略有多种不同的定义方式,不同的领域有不同的标准。例如,IETF/DMTF 定义策略为一系列管理规则。有许多人把策略简单地等同于一些规则,这种看法是狭隘的。这里,我们采用相对宽松的定义:策略是用来指导系统行为的方法。在多智能体系统中,

策略用来指导多智能体的协作过程,每个智能体都遵循相同的策略。策略告诉智能体应该做些什么(目标),怎样做(动作),如何量化参数(效用参数),从而指导智能体的行为。

Kephart 等人定义了一个统一的框架,用来进行自动计算,计算时考虑的主要是系统所处状态和当前所采取的动作^[9]。通常情况下,我们需要对智能体所处的状态进行标注,对于智能体中某些重要的部分,同样需要进行标注。且进行标注的时候,还要有时间点的考虑。时间点在标注的时候,具有非常重要的作用。通常情况下,我们在表示状态 S 的时候,状态 S 会有一个属性向量。在该向量中的参数,或者是通过传感器直接获得,或者是通过智能体内部的推理部件进行推理而得出。一个策略会直接或间接地导致系统中动作的发生。当动作发生时,会导致智能体或者智能体内部的某些部件发生变化。对于维持的动作,会保持现有的状态不变;而如果是实现型的目标,则会发生相应的变化,且该变化会达到最终目标的一个中间状态。这个统一的框架,同样适用于多智能体系统。一个多智能体系统,在时刻 t ,系统所处的状态为 S_0 ,在 S_0 状态,系统中有一系列属性技巧数值来对其进行表示。动作策略会直接或者间接地导致动作的发生。在这样的情况下,系统会从一个状态转移到另外一个状态。我们可以把策略看作一个转移函数,多智能体可以通过策略进行状态的转移。如图 3 所示,根据所采取的策略的不同,智能体会采取不同的动作,从而,系统也会达到不同的状态。

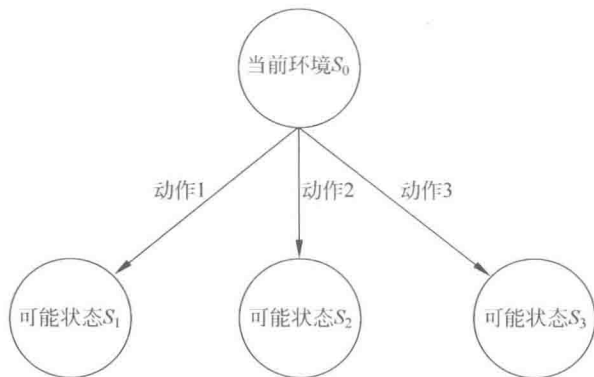


图 3 多智能体策略驱动的状态转移

3.1 动作策略

动作策略用来描述在给定状态下多智能体所采取的动作策略。一般的动作策略表示为 $P = \{S_t, A, _, _ \}$, 其中“ $_$ ”表示空。动作采用产生式规则的形式,即 IF(Condition) THEN(Action)。Condition 表示动作产生的智能体需要满足的前提条件,它或者是一个状态或者是一系列状态满足当前动作执行的条件。Action 表示需要执行的动作。

3.2 目标策略

目标策略不是给定一个状态,要求系统需要采取某些动作达到该状态,而是用来描述系统需要达到的状态。目标策略有时给出的是系统需要达到的一个状态,有时给出的是系统需要达到的几个状态,系统在执行时可以根据自身情况选择一个状态加以实现。在

动作策略中,系统会采取一个非常明确的策略而达到系统需要抵达的状态。在目标策略中,系统给定了目标状态,那么在实现过程中,需要一个动作序列来到达给定目标。这个动作序列可能很长,也可能很短。智能体每产生一个动作,系统的状态就会发生改变。因而,系统由一系列状态转换而成,是一个离散事件序列。通常,目标策略表示为 $P = \{S_i, _, S_g, _ \}$, 其中“ $_$ ”表示空。

3.3 效用函数策略

效用函数策略是一个目标函数,该函数指出了系统达到可能状态的概率。效用函数相对于动作策略和目标策略,提供了一个更加宽松和详细的机制。但是效用函数的制定者,需要对系统本身具有非常翔实的了解,能够充分地了解模型本身以及认知模型所采用的算法、优化等。通常,目标策略表示为 $P = \{S_i, _, _, U\}$, 其中“ $_$ ”表示空。

4 联合意图

多智能体之间的协同工作显示了多智能体的社会性行为。为了揭示多智能体之间合作的这种关系,需要提供有效机制对其进行分析。对于智能体来说,我们需要对智能体之间的联合性社会行为进行分析。例如,智能体之间的协作机制、单个智能体动作的选择机制和智能体内部状态变化的机制等。在 ABGP 智能体进行协同时,需要提供抽象的概念模型。联合意图抽象概念模型可以有效地支持多智能体之间的协同行为。

多智能体之间进行协同,主要分为两种情况。一种是所有的智能体共同实现一个任务,一种是所有的智能体共同维护一个智能体现有的状态。我们称共同实现一个任务的多智能体为实现型多智能体,共同维护一个状态的多智能体为维护型多智能体。对于实现型多智能体,如大型的计算任务,每个智能体承担一部分计算量,最终完成整个计算任务。对于维护型多智能体,多个智能体共同维持一个现有状态,如,多个智能体共同移动物体,且在移动过程中物体保持状态不变。显然,该种约束对多智能体会产生影响,它们广泛分布于多智能体合作中。为此,我们将按其特点,分别进行讨论。

在多智能体中,除了单个智能体的信念外,外部环境也对其产生了显著影响。当智能体在执行任务的过程中,除了对任务本身需要了解外,还需要时刻关注外部环境对它的影响。联合意图体现了多个智能体的联合行为选择,因此选择性和联合性是联合意图的本质属性^[1]。

智能体的意图对应智能体实现的某个命题,是智能体需要实现的目标或者任务。在实现型联合意图中,智能体通过对路径的选择,最终达到目标。这里,我们将联合意图中智能体对环境的感知分别应用于实现型和维护型场景。在实现型中,只要意图还没有最后实现,那么智能体就会一直进行努力,且在这个过程中智能体中的环境存在智能体执行的条件。在维护型中,智能体的每次动作都需要对当前的意图进行维持,同时外部的环境感知满足智能体执行的条件。 $Aware(x, \varphi)$ 表示智能体 x 所感知到的环境信息,在当前情况下,智能体可以继续执行意图 φ 。

在这里,我们对毛新军^[1]等人的工作进行拓展,将环境感知添加到多智能体联合意图之中。首先,我们给出了实现型和维护型的语义。

定义 1 实现型意图的语义: $M \models_i AI(x, \varphi)$ iff $M \models_i Bel(x, \neg \varphi) \wedge Aware(x, \varphi)$; 且 $(\forall S; S \in (x, t) \Rightarrow \models_{s,t} F Bel(x, \varphi) \wedge F Aware(x, \varphi))$ 。

上述语义揭示了实现型意图语义的本质属性, 其中 F 是存在时序量词。我们将智能体意图视为智能体对世界轨迹的选择。在这个过程中, 智能体在时刻 t 确定意图 φ 没有实现, 并且当前的外部环境 $Aware(x, \varphi)$ 满足智能体执行条件, 最终智能体实现了意图 φ 。在这个执行过程中, 外部环境应该一直都可以满足智能体执行条件, 否则, 即使智能体知道目标 φ 是大家的联合意图, 但由于外部环境的改变, 仍然不能够完成任务。

定义 2 维护型意图的语义: $M \models_i MI(x, \varphi)$ iff $(\forall S; S \in C(x, t) \Rightarrow M \models_{s,t} G Bel(x, \varphi) \wedge F Aware(x, \varphi))$ 。

上述语义揭示了维护型意图语义的本质属性, 其中 G 是 F 的对偶算子, 即 $G\varphi = \neg F(\neg \varphi)$, 因而 G 是全称时序量词。智能体在维护意图的时候, 首先, 在最开始的状态, 智能体认为目标已经实现, 且当前外部环境满足维持目标的条件。随着时间的推移, 智能体每次状态的改变都有两个约束条件, 即当前状态维持不变和当前的外部环境支持智能体自身条件, 使得智能体可以完成维护目标的任务。

4.1 联合实现型意图

定义 3 共同实现型选择: $MAI(x, y, \varphi) = AI(x, \varphi) \wedge AI(y, \varphi)$ 。

两个智能体具有共同的选择来实现 φ , 但是这并不等同于他们具有联合实现型的意图 φ 。为了形成联合意图, 需要智能体之间的意图互知与合作。

定义 4 互知实现型意图: $MAB(x, y, \varphi) = MB(x, y, AI(x, \varphi) \wedge AI(y, \varphi))$ 。

上述概念表明, 智能体之间的意图互知, 知道双方都有实现性意图 φ 。

定义 5 弱实现型合作: $WAC(x, y, \varphi) = (Bel(x, \varphi) \wedge \neg Bel(x, Bel(y, \varphi)) \rightarrow AI(x, MB(x, y, \varphi))) \wedge (Bel(x, AG \neg \varphi) \wedge \neg Bel(x, Bel(y, AG \neg \varphi)) \rightarrow AI(x, MB(x, y, AG \neg \varphi)))$ 。

$AG \neg \varphi$ 表示对于所有的路径, φ 在这些路径上的任何时刻均不成立。弱实现型合作是指, 对于智能体 x 和智能体 y , 如果 x 知道 φ 已经成立, 并且不知道 y 知道 φ 成立, 则 x 让双方都知道 φ 成立; 如果 x 知道 φ 永远不可能成立, 并且不知道 y 知道 φ 永远不可能成立, 则让双方都知道 φ 永远不可能成立。

定义 6 实现型合作: $M \models_i MAC(x, y, \varphi)$ iff $\forall S; S \in C(x, t) \Rightarrow M \models_{s,t} (MB(x, y, WAC(x, y, \varphi) \wedge WAC(y, x, \varphi)) \text{ Until } \neg AI(x, \varphi) \text{ 且 } \forall S; S \in C(y, t) \Rightarrow M \models_{s,t} (MB(x, y, WAC(x, y, \varphi) \wedge WAC(y, x, \varphi)) \text{ Until } \neg AI(y, \varphi))$ 。

智能体 x 和智能体 y 具有实现型意图合作是指, 智能体双方都知道自己会与对方合作, 也知道对方会和自己合作, 知道自己放弃目标 φ 。

定义 7 联合实现型意图: $JAI(x, y, \varphi) = MAI(x, y, \varphi) \wedge MAB(x, y, \varphi) \wedge MAC(x, y, \varphi)$ 。

上述定义非常清晰地表示了联合实现型意图的本质。首先, 需要智能体双方都具有相同的选择 φ ; 其次, 知道双方都有这样的选择 φ ; 最后, 知道双方非常有必要进行合作。基于上述语义定义, 我们得到了如下重要属性。

定理 1 $\models \text{JAI}(x, y, \varphi) \rightarrow \text{MB}(x, y, \neg \varphi)$ 。

这一定理解释了在联合意图实施的最开始,意图 φ 在该时刻不成立。

定理 2 (实现型联合意图一致性) $\models \neg (\text{JAI}(x, y, \varphi) \wedge \text{JAI}(x, y, \neg \varphi))$ 。

即在实现型意图实施的过程中,不存在冲突。所有的智能体既一起实现意图 φ ,也一起不实现 φ ,这样的情况是不存在的。

定理 3 与智能体意图一致: $\models \neg (\text{JAI}(x, y, \varphi) \wedge (\text{AI}(x, \neg \varphi) \vee \text{AI}(y, \neg \varphi)))$ 。

即智能体的联合意图与智能体内在的意图是一致的。

定理 4 联合意图可满足性 $\models \text{JAI}(x, y, \varphi) \rightarrow \text{MB}(x, y, \text{EF}\varphi)$ 。

对于联合意图,智能体相信意图最终存在时间和路径实现最终的结果。

定理 5 与信念一致性 $\models \neg (\text{JAI}(x, y, \varphi) \wedge (\text{Bel}(x, \neg \text{EF}\varphi) \vee (\text{Bel}(y, \neg \text{EF}\varphi))))$ 。

上述定理指出,智能体中联合意图与智能体的意图是一致的。

定理 6 非冲突性 $\models \text{JAI}(x, y, \varphi) \wedge \text{JAI}(x, y, \psi) \rightarrow \text{MB}(x, y, E(F\varphi \vee F\psi))$ 。

上述定理说明意图 φ 与意图 ψ 会以某时序得以实现。

4.2 联合维护型意图

定义 8 共同维护型选择 $\text{MMI}(x, y, \varphi) = \text{MI}(x, \varphi) \wedge \text{MI}(y, \varphi)$ 。

共同维护型选择,首先需要智能体有共同的选择维持意图 φ 。

定义 9 互知维护型意图 $\text{MMB}(x, y, \varphi) = \text{MB}(x, y, \text{MI}(x, \varphi), \text{MI}(y, \varphi))$ 。

上述概念表明,智能体之间的意图互知,知道双方都有维护性意图 φ 。

定义 10 弱维护型合作 $\text{WMC} = (\text{Bel}(x, \neg \varphi) \wedge \neg \text{Bel}(x, \text{Bel}(y, \neg \varphi))) \rightarrow \text{AI}(x, \text{MB}(x, y, \neg \varphi))$ 。

弱维护型合作的本质意义是使得合作的双方都知道合作的信息。

定义 11 维护型合作 $M \models_i \text{MMC}(x, y, \varphi)$ iff $\forall S: S \in C(x, t) \Rightarrow M \models_{s,t} (\text{MB}(x, y, \text{WMC}(x, y, \varphi) \wedge \text{WMC}(y, x, \varphi))) \text{ Until } \neg \text{MI}(x, \varphi)$ 且 $\forall S: S \in C(y, t) \Rightarrow M \models_{s,t} (\text{MB}(x, y, \text{WMC}(x, y, \varphi) \wedge \text{WMC}(y, x, \varphi))) \text{ Until } \neg \text{MI}(y, \varphi)$ 。

智能体 x 和智能体 y 具有维护型意图合作是指,智能体双方都知道自己会与对方合作来维护意图,也知道对方会和自己合作,知道自己放弃目标 φ 。

定义 12 联合维护型意图 $\text{JMI}(x, y, \varphi) = \text{MMI}(x, y, \varphi) \wedge \text{MMB}(x, y, \varphi) \wedge \text{MMC}(x, y, \varphi)$ 。

上述定义非常清晰地表明了联合维护型意图的本质。首先,需要智能体双方都具有相同的选择 φ 意图进行维护;其次,知道双方都有这样的选择 φ 来进行维护;最后,知道双方非常有必要进行合作。

定理 7 $\models \text{JMI}(x, y, \varphi) \rightarrow \text{MB}(x, y, \varphi)$ 。

这一定理揭示了维护型联合意图的一个非常重要的条件,即都认为 φ 已经成立。

定理 8 维护型联合意图一致性 $\models \neg (\text{JMI}(x, y, \varphi) \wedge \text{JMI}(x, y, \neg \varphi))$ 。

即在维护型意图实施的过程中,不存在冲突。所有的智能体既一起维护意图 φ ,也一起不维护 φ ,这样的情况是不存在的。

定理 9 与智能体意图一致 $\models \neg (\text{JMI}(x, y, \varphi) \wedge (\text{MI}(x, \neg \varphi) \vee \text{MI}(y, \neg \varphi)))$ 。

即智能体的联合意图与智能体内在的意图是一致的。