

协调多机器人操作手的研究

——专家意见综述

武 斐

(北京大学力学系)

说明 为了确定协调多机器人系统的研究课题, 1987年1月在美国圣迭戈召开了一次专题研讨会, 30位国际著名的专家应邀参加, 会议发表了反映他们集体意见的报告, 本文将其主要内容整理如下, 谨供参考。

一、 引 言

(一) 协调多机器人系统的应用前景

协调多机器人系统的潜在应用范围广泛, 从深海探险, 产品制造, 到外层空间的维修服务, 这些地方经常需要两个或多个臂(手)熟练地完成复杂而灵巧的任务。由于多机器人系统能胜任大量不同种类的工作, 于是需要明确有关的基本概念及实际问题, 确定协调多机器人系统的重要研究课题及需解决的问题, 以便在现有工作基础上, 在现有技术条件下, 最大可能范围内应用协调多机器人系统。

研讨会集中了来自不同部门活跃于或有兴趣于这一领域或相关学科的30位著名专家, 对协调多机器人系统的研究提出了广泛的意见, 讨论的主题就是协调多机器人操作手的规划、控制和应用。

(二) 协调多机器人系统面临的问题及未来方向

(1) 轨迹规划, 障碍躲避, 感觉信息, 知识库系统

首先, 一个基本问题就是如何对给定的任务描述, 给出多臂机器人协调操作的最优轨线。能否定义一个势场(用Khatib方式或类似的方式), 应用到协调多机器人的控制和躲避障碍上? 在规划问题中如何获得并利用感觉信息进行智能规划?

另一个方面面临的问题是如何处理不确定性。在现有的机器人系统和机器人学研究中, 对不确定性的处理是相当肤浅的, 例如, 当传感器送来新提供的信息时, 系统通常是作为具完全信息的情况来处理的, 这类研究的缺陷在多机器人系统由于在同一工作空间内进行独立操作而造成高度不确定性不明显的情况下表现得尤为清楚。不确定性引入了在完全信息模型中不会出现的新课题, 如算法收敛性等。如何处理不确定性, 并将部分已知信息结合到不确定性中, 对理论与实验研究提出了新的挑战。

与规划问题有关的一个问题是控制方案的选取。我们知道,分散控制能提供较多的柔性,异步操作和并行处理;但在需多机器人系统之间高度合作的任务中(如两操作手搬一物件,并使其一个表面保持水平),分散控制则很难完成。另一方面,尽管集中(分层)控制更容易适应多机器人系统协调完成的工作,但往往使得系统缺乏灵活性,并且会为计算瓶颈所困扰。能否设计这样的模型,使其成为这一课题理论和应用研究的框架?这是对集中(分层)控制分散化的问题。

(2) 动态建模,控制决策

动态问题所涉及的方面有:多链机器人系统动态仿真的最佳算法;串行、并行算法计算量的量阶估计和减小办法;以及寻找某种约束以避免算出的轨迹和方向解发散。

需要研究协调运动中多机器人系统间的载荷分布;求出协调多机器人系统的控制力分布,为此要权衡计算简单和控制优化。

处理多机器人系统数学模型过程中,似乎对选择独立动态变量有分歧,这将会在实现控制决策中出现问题。由于不存在选择依赖任务的协调功能和反馈控制的一般规划,这使得臂控制的各种任务的经常性的分析与综合非常复杂。

(3) 软件和计算机语言,人工智能的角色,协调多机器人系统应用的研究

因为人们在编程任务方面不能做得尽善尽美,从而需要设计能自动生成驱动多机器人系统程序的工具。此外还需找到确认并行机器人程序正确性的分析方法。当然计算机仿真是一种选择,实际机器人的周密试验又是一种,但这两种方法都难免有瑕疵和疏漏。

借自操作系统和并行编程的用于描述操作同步的方法太复杂、太低级,以至于对大多数机器人用户说来不适合。协调多机器人系统对计算能力和实现控制的特殊用途的结构的要求也会不断增长。还应考虑机器人结构对所需编程和支持系统类型的影响。

协调多机器人系统怎样以最优的方式分配任务?由于它们不对空间和因果关系进行推理,所以就目前看来,人工智能中的规划系统似乎还不能解决真实世界的问题。我们是否得等到人工智能的研究者在解决一般规划问题方面取得恰当的进展的时候?什么是取得进展的最佳途径?

协调多机器人系统使得完成任务的方式惊人的增多,这影响到任务级和操作级上的规划,于是出现了新的课题:考虑到完成任务的最大能力,如何把一个任务分解成子任务,并生成子任务的有效部分指令?如何安排子任务;在考虑到时间和能量最优与次优的情况下,将它有效地分配给机器人?考虑到具有短暂推理的最大操作并行,操作同步,如何规划操作?在此状态下,人工智能是否足以应付还是需要人的智能参予?

在分担职责时遇到的问题是,对协调半独立机器人系统在实现共同目标时会相互干扰,特别是在共享资源等情况下。

作为一种功能和任务,机器人之间的相互通讯将扮演什么角色?如何对应到各种有用的通讯模块上去?

由于协调运动中,多机器人手间的相对位置和方向误差诊断和校正十分困难,人工智能能在完成任务方面做何贡献?即人工智能怎样向操作员提供可能的误差源及可能的补救措施,甚至自动完成这一任务。

二、关于协调多机器人系统的研究课题——集体的意见

(一) 协调多机器人系统中运动规划, 障碍躲避和感觉的研究课题

机器人系统中有移动机器人和机器人操作手两类。运动规划和障碍躲避因任务而异。明确协调多机器人执行的任务、所期望的协调程度以及可利用的环境信息, 有助于更好地提出问题。当然恰当地结合可用的感觉信息, 无疑对准确的运动规划是重要的。

运动规划和避免碰撞出现在下列几类任务中: 设计初始位置到目标位置的路径; 避免机器人相互碰撞; 避开静止或移动的障碍; 建立环境图; 以及上述情况的任意组合。

协调程度依赖于所考虑的任务。如果操作手仅仅分享共同的工作空间, 而工作独立进行, 这种松散的协调, 允许运动规划中相当大的自由, 这里共同的问题只是避免碰撞。而另一方面, 在象操作手移动同一个物体这样的紧密协调中, 遇到的问题是运动规划中结合严格的运动学、动力学约束。

多机器人系统经常面临完全已知或部分已知的环境, 对前者, 从前的离线求解对运动规划仍是需要的; 而后者突出的问题是在线求解, 并依据感觉信息来降低不确定性。

规划问题应包括应用传感器提供的外界信息, 由于环境信息影响多机器人系统规划的运动, 因而机器人系统应根据环境的变化修改规划的轨迹。

一般说来有关协调多机器人系统的这方面研究有以下几个课题:

(1) 运动规划的算法

协调多机器人系统运动规划的算法研究粗略地分为如下几方面: A. 环境完全信息已知条件下的移动机器人; B. 环境完全信息已知条件下的操作手; C. 含环境不确定信息条件下的移动机器人; D. 含环境不确定信息条件下的操作手。直到最近, 这方面的研究一直严重偏向于 A、B 两方面, 已出现包括精确(非启发)和启发性的方法的各种研究, 但遇到的共同困难是处理巨大信息量的计算瓶颈。目前大家期望找到更有效的算法。相对而言 C、D 两方面所做的工作很少(D 方面更少), 其中的具代表性的问题是如何利用全部信息简化模型, 而这里主要困难在于如何确保提出的算法收敛。

(2) 部分已知环境中运动的规划

查询环境的新信息, 并修正部分已知的外界模型的不确定性, 需要新的方法。特别当新的测量结果与以前假设的不同甚至矛盾时, 就要修改描述环境的知识库, 这种对运动规划的影响需要新的方法。当环境包括运动着的障碍时, 运动规划就应包含根据传感器测量结果, 辨识出描述这一障碍运动的基本参数的功能。

需要新的算法来设计运动规划和避免碰撞, 这些算法必须涉及全部信息, 并能在合理的时间内进行计算, 这对象在工厂流程等组织好的环境中的应用来说是需要的。同时这些计算方案必须能处理诸如出现在空间应用, 户外车辆的未组织好的环境中的不确定性。

(3) 运动规划中的层级、协调程度和分散化程度

弄清楚规划问题是否能够及怎样依相应的控制层次划分为局部和整体规划, 需要建

立分层模型,需要根据多机器人系统的任务,研究简单控制和复杂控制的相对优点。应当研究与运动规划有关的分层和控制策略之间的相互影响,以帮助决定多机器人系统的控制,这一工作大概需要象控制理论专家与计算机科学家这样不同学科的研究者之间的互相配合。

多机器人系统中各操作手之间的协调程度与控制中的集中/分散课题紧密相关。分散控制提供更多的柔性,但在紧密协调的环境中则难于达到目的。另一方面集中控制有助于明确的协调,但往往缺乏灵活性并且计算量要求过大,因而需要建立研究这样课题的模型。多机器人系统中的功能协调也依赖于分配给不同操作手的自治程度,应当研究此系统中自治与协调的关系,得到的结果将给集中/分散控制课题带来新的启示。

(4) 运动规划中加入机器人动力学

今天的规划系统很大程度上忽略了动力学,并假设任意不碰的路径能完全实现。机器人动力学考虑进来对于视速度、精度十分重要的机器人系统来说特别关键。

(5) 用于运动规划的传感器,感觉信息

应当发展用于运动规划的直接提供有关信息的传感器,这些传感器能提供最近的和灵活的触觉信息。如同“皮肤”一样,使机器人的“身体”对触到障碍很敏感。

需要发展处理有用的感觉信息(可能以数据形式)的有效方法。并行计算对降低计算时间,并一般地改进计算效率是必要的。算法能从十分重要的感觉信息中选择出适用的信息,如从表明触到障碍的传感器获得的信息中选择,所得的感觉数据应改进计算机中存放的外界模型。

需要研究在运动规划和协调中融合来自相同或不同传感器的不同信息。模型应当为应用不同精度、范围、可靠性、分辨率的传感器提供共同的框架。

综上所述,关于运动规划,躲避障碍和感觉方面的重要研究课题概括如下:

运动规划的算法设计(包括具有完全信息和不确定性两种情况);分级和非分级控制;集中/分散控制,各机器人之间的自治与协调;运动规划中利用系统动力学;运动规划中加入不确定(随机)信息;发展用于运动规划的传感器及传感器处理方法;感觉数据的表达;融合来自不同传感器的数据,检测和描述由传感数据得到的障碍;计算物体的运动参数。

(二) 协调多机器人系统中动态建模、控制决策的研究课题

基本研究中心在于组织好的但非确定的环境下多机器人系统的动态行为、建模和控制,其功能可以是自治的,也可以是相互影响的。

机器人应当展示一定的机器智能程度,以从事复杂的工作,他们体现工业、空间、医学、水下及核工业等诸领域的现代应用。以下课题是遍及多机器人研究领域的。

(1) 分散/自治程度

多机器人控制的集中程度随不同的应用而变化,研究应围绕多机器人的各种应用,即在如下几方面进行:完全集中,分层集中(高级,集中低级,分布)或完全分散的控制系统。

(2) 系统组织结构

建议研究基于机器智能决策的智能控制的分层结构,即:组织(战略规划)、协调(战术规划)、执行三级。

(3) 不确定性的处理

信息中的不确定性可通过利用熵作为测量结果的随机模型来处理,建议研究不同智能控制级的恰当模型。

(4) 可靠性

研究应包括软件、硬件规划中的误差限、多余信息、选择。

(5) 综合和传感器融合

建议研究含多机器人系统智能控制的传感器、运动控制和信息流的模型。

(6) 分解综合

在研究任务分解方法的同时,应当注意研究综合智能机器组织级(战略规划)上的基本活动和规则。

以上诸方面可总结为动力学和控制决策几个一般性课题,以及规划和运动学几个特殊课题。

多机器人系统动力学方面有:约束和无约束下的闭链动力学(常见载荷下的力控制和力或力矩的分布;载荷分布);动态模型的化简与控制(优化);动态工作空间;对动力学问题,力分布计算速度的详尽说明;关于运动学、动力学和控制(包括对在线预测控制的实时计算)的并行算法;规划和碰撞反弹(接触控制);多连杆机器人与具多个手指的手之间的关系;驱动器动力学和空间驱动器中含多度的限制。

多机器人系统控制方面有:多机器人的瞬时力控制和位置控制;多机器人系统的适应控制;面向研究部门的通用控制器;多机器人控制的特殊结构;非刚性和铰接物体的操作;端点感觉与控制;手的微运动控制;柔性杆、柔性臂和柔性铰的控制;移动控制(轮式或行走机器人);冗余臂的控制。

多机器人系统规划方面有:任务规划和任务分解;手—臂—腿系统,多机器、多肢体之间的协调。

多机器人系统运动学方面有:具有共同工作空间的多臂协调;运动学建模精度;冗余多臂;运动学结构位形的设计和优化;运动学与躲避障碍。

(三) 关于协调多机器人系统软件和人工智能的研究课题

(1) 协调多机器人系统的语言需求

多机器人系统需要具有一定特点的编程语言。为使一种语言能用于多机器人系统中,期望它有如下的性质:适当的同步化元素,适于传感器数据描述的结构,以及不同编程水平上的用户接口,图形接口为用户提供信息从而增强了交互功能。这些语言还应能为用户提供或保留对低级程序的控制访问。

语言应能为处理器提供由高级到低级的描述转换和翻译,这可由多级网络处理来实现。由于计算机的限制,问题通常按不同抽象水平而分解,例如机器人控制问题可分解为五级:提出目标、规划、任务分解、指令和控制(NBS),这些级需要不同的技术,这些应用中的语言应能将这级别集成起来以助于多机器人系统的协调。

面向目标的结构是否适用于多机器人系统的描述,这里可能需要研究一种新的计算机编程技术。人们认为机器人学比计算机科学至少落后十年,特别是计算机科学中有完善的操作系统、程序和接口,但在机器人学中它们却是落后的;对于工业上应用的传感器的编程语言也有类似情形:实验室中的传感器是先进的,但工厂中实际应用的则相当落后,这是否与表达感觉信息所用的语言有关?特别在精密灵巧的任务以及冗余机器人中使用的语言中也可发现这些缺点,这可能需要使用专用的语言。

(2) 协调多机器人系统的误差检测和校正

柔性和适应性是语言的重要性质,特别对通常缺乏这些特点的机器人学中的语言更是如此。由于误差可以出现在编程、操作、完成任务、拿物体等地方,所以将会产生一个误差分类学。机器人系统操作中控制误差的设计方法和误差分析都是落后的,因而需要进行这方面的研究。的确,误差发生时应该做些什么呢?我们需要有误差诊断和从中校正的方法。

据推测,缺乏可靠的误差诊断可能是紧急情况下,诸如撤回、移开等反射动作一直没引入机器人学的主要原因。机器人学中的认识作用将被证明是有用的。为正确操作,应对误差进行记录、分析和诊断,结果应向操作人员报告并解释。

(3) 多机器人系统的任务规划

处理误差校正的一种方式是在进行再规划,如在多机器人系统任务规划级上进行的那样。这将需要恰当地描述任务,因此任务的分类与特征描述是需要的,应当研究任务类别与路径分解的关系。

任务分类也将给多机器人系统的结构选择带来更多的希望,对一特定的任务,最优操作需要多少臂?如何在使用固定设备与附加臂之间进行折中?至少对于特定的问题,CAD模型能提供答案吗?虽然现在的CAD系统不包含自动规划模块,但CAD模型的接口对多机器人系统的任务规划可能是有用的。

应当有效地进行任务级和运动级上的规划,这适于确定标准规划,此规划能有效地修改较小的编程而不必重复整个过程规划,这将增添系统编程的灵活性。任务规划语言应允许利用图形、仿真对规划进行验证,如有可能,验证应当在无强制性的、人为的干预下进行。

(4) 具分布智能的协调多机器人系统

为了同个别机器人一样灵活,需要对多机器人系统提供人工智能,这一智能分布的安排将一定程度上减轻集中计算的负担。自治子系统之间的通讯通道一定得建立。因为闭运动链经常会失去自由度,所以对子系统自由度的各种分布都应加以研究。与此紧密会联的问题是,机器工具和机器人之间特别在工作单元内的任务配置和职责分布。

(5) 对具有多机器人的工作单元的设计辅助

一个工作单元通常可考虑为如同一个处理器一样工作,目的是为获得恰当的设计,设计似乎还在没有系统论证的情况下选择。工厂通常含有几个工作单元,它们的操作应恰当地综合到规划中去。

(6) 人工智能和控制的综合,多机器人系统研究中的系统观点

用于不同层级（低—高—监控）的程序语言的集成是要马上予以关注的，将人工智能加到多机器人系统中去，似乎是改进系统自治性和智能必须遵循的。

以上关于协调多机器人系统在软件和人工智能方面的研究课题可概述如下：

对语言的需求：为同时行动而用的同步化元素；传感器相互作用的语言学结构；面向所有级别的机器人控制系统的适当的用户交互；对处理器和低级语言的转换和翻译；冗余操作手的运动学表达；从多机器人角度（信息传送，面向目标的程序等）的高级编程技术。

误差检测和校正方面：误差的分类；处理不确定性的方法；系统中误差检测的结合；对误差处理校正的方法；误差的记录、诊断和解释；学习（模型的发现与提炼）。

任务规划编程方面：多机器人任务的特征；装配规划中 CAD 模型的用途；具有共享资源的多因素规划系统；对产量增长的规划的修改；规划的验证。

最后三个方面是：具有分布智能的协调多机器人系统；多机器人工作单元的设计辅助；多机器人系统研究中的人工智能和控制系统观点的综合。

致谢 本文的完成得到黄琳教授、郑应平副教授的热情支持与指导，于此表示衷心的感谢。

Study of Coordinated Multiple Robot Manipulators ——A Collective View

Wu Fei

(Department of Mechanics, Peking University)

Abstract

This version summarizes the report of the workshop held January 7-9, 1987 in San Diego, California with the help of the sponsorship of National Science Foundation, and Dr. H. Moraff. The participants invited included 30 internationally known active researchers in the fields of robotics and computer science.