

双机器人协同控制研究综述^①

陈 阳, 郑甲红, 王 婧

(陕西科技大学 机电工程学院, 西安 710021)
通信作者: 郑甲红, E-mail: 463578575@qq.com



摘 要: 多机器人协同是未来机器人研究的一大热点, 双机器人系统是其中的一个典型代表. 针对目前双机器人协同系统的特性及常见应用, 从动力学模型的建立、轨迹规划和协同控制等 3 方面介绍了双机器人协同系统的研究内容, 分析各方面目前存在的技术漏洞和技术难点, 指出未来发展的方向.

关键词: 双机器人系统; 动力学模型; 轨迹规划; 协同控制

引用格式: 陈阳, 郑甲红, 王婧. 双机器人协同控制研究综述. 计算机系统应用, 2022, 31(2): 13–21. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8319.html>

Review on Dual-robot Cooperative Control

CHEN Yang, ZHENG Jia-Hong, WANG Jing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Multi-robot coordination is one of the hot spots in future robot research, with dual-robot systems acting as a typical representative. According to the characteristics and common applications of dual-robot cooperative systems, this study introduces the research contents on these systems from three aspects, namely the establishment of dynamic models, trajectory planning and cooperative control. Moreover, it analyzes the technical vulnerability and difficulties in various aspects at present and points out the future development direction.

Key words: dual-robot system; dynamic model; trajectory planning; coordinated control

20 世纪, 随着机器人技术的飞速发展和日渐成熟, 机器人被广泛应用在各领域中, 为工业生产需求提供了很多便利. 由于工业生产愈加复杂的工况要求, 单机器人已经很难满足作业要求, 众多科研工作者对双、多机器人系统展开了深入研究^[1-3]. 同时需要注意的是双机器人与双臂机器人并不相同, 虽然两者同样是使用两机械臂协同作业, 但双臂机器人只需一套控制系统和一套坐标系, 而双机器人需要两套控制系统和两套坐标系. 本文针对的是双机器人协同控制. 与单机器人作业相比, 双机器人作业可被用于很多工况复杂环境场合, 具有更大的灵活性和负载能力^[4-7], 也具有更高的可靠性. 然而, 双机器人协同作业在具有更多优点的同时, 也在研究过程中面临更复杂的问题. 本文针对

双机器人系统涉及的动力学模型建立、轨迹规划问题^[8,9]以及双机器人作业中的协同控制问题等 3 方面研究工作的内容, 分析双机器人系统目前存在的技术漏洞和技术难点, 指出未来发展的方向.

1 双机器人协调系统分类

1.1 机器人特性分类

按照机器人运动特性来分类, 机器人可分为以下 3 类.

(1) 底座固定机器人. 此类机器人最大的特点是基座常用铆钉等物理约束固定在地面上, 例如文献 [10–12] 提到的机器人. 即机器人的基坐标位置固定, 且在整个作业过程中都不会发生变化, 因此使用此机器人避免了各机器人基座坐标系的坐标转换, 更易获得各机器

^① 基金项目: 陕西省重点研发计划 (2020NY-116)

收稿时间: 2021-04-13; 修改时间: 2021-05-19; 采用时间: 2021-06-02; csa 在线出版时间: 2022-01-17

人的相对位置。

(2) 移动机器人. 与基座固定机器人相比, 移动机器人的工作场所更广阔, 但同时移动机器人的动力学特性和各机器人之间的坐标关系也更复杂, 如文献[13-15]均对此作了详细分析和论述. 然而由于双机器人协调系统的应用场合限制, 所以常采用固定机器人, 本文以基座固定机器人为论述重点。

(3) 空间机器人. 空间机器人是在空间环境中活动的, 代替人类完成工作的机器人. 空间机器人可以分为遥操作机器人、自主机器人两种. 例如, 空间机器人可以用于代替人类在高空中完成一些地面机器人无法满足的工作. 而空间环境和地面环境差别很大, 空间机器人工作在微重力环境中, 空间机器人与地面机器人的要求也必然不相同, 有它自身的特点。

1.2 双机器人作业应用分类

与单机器人作业相比, 双机器人作业可被用于更为复杂的应用场合, 常用的双机器人协作被用到轴孔装配、复杂路径焊接、搬运大型物体或重型物体等场合, 具有更大的灵活性^[16]和负载能力^[17], 也具有更高的鲁棒性^[18]。

(1) 轴孔装配^[19-21]. 在人力劳动密集的装配中, 可采用双机器人代替双手进行统一简单的装配. 例如使用双机器人进行螺栓螺母装配, 一个机器人精准定位到轴孔位置, 将螺栓安装在对应位置, 另一机器人根据螺栓位置, 持有螺母, 到达相应位置, 两机器人相互配合拧紧螺母, 完成装配. 这类应用需要机器人具有极高的定位能力和极强的柔顺性, 才能完成螺栓螺母装配的取、放、拧紧这一系列需求, 如图1所示。

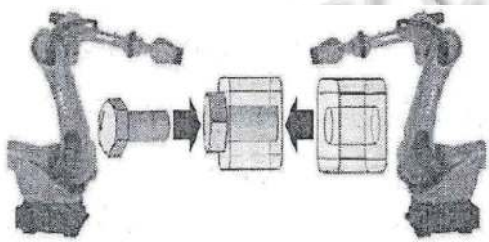


图1 双机器人轴孔装配

(2) 复杂路径焊接^[22-24]. 使用双机器人进行较为复杂需求的路径焊接, 即一个机器人搬运抬起被操作物体, 根据复杂焊缝的最佳起始焊点规划此机器人运动位置及位姿, 另一机器人为焊接机器人, 对复杂焊缝进行焊接, 如图2所示。

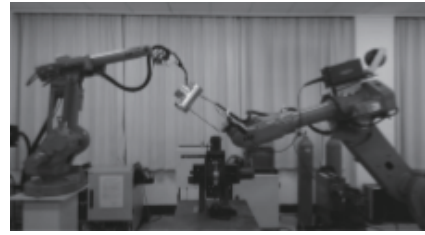


图2 双机器人复杂路径焊接

(3) 搬运物体^[25-27]. 采用双机器人协作搬运的物体, 一般多是尺寸较大或质量较大的物体. 根据作业任务需求双机器人共同完成对被操作对象的抬起、运动、放下等. 较为常见的双机器人搬运, 是在双机器人将需求抬起被操作物体到相应位置后, 由其他的焊接机器人对其进行焊接, 如图3所示。



图3 双机器人搬运物体

1.3 双机器人应用耦合分类

双机器人协同系统的应用大致可以分为两类:

(1) 紧协调任务^[28], 例如双机器人对大型重型物体的搬运过程, 各机器人与工件间均无相对运动, 且保持位姿和速度的严格同步, 此类任务中各机器人均与被操作物体直接接触, 且末端执行器有力的产生, 则对于此类任务各机器人末端位姿满足:

$$x_1 = U \cdot x_2 \quad (1)$$

其中, x_1 和 x_2 分别表示两搬运机器人末端位置矩阵, U 为两搬运机器人间的齐次变换矩阵。

(2) 松协调任务^[29], 例如对搬运机器人所搬运的工件使用焊接机器人焊接等, 则对于此类任务各机器人末端位姿满足:

$$x_1 = U \cdot x_2 + \alpha(t) \quad (2)$$

与式(1)中紧协调关系不同的是, 松协调表示焊接机器人和搬运机器人间可能存在着一一定的相对位移 $\alpha(t)$, $\alpha(t)$ 为时变向量。

由于松协调任务中各机器人有独立的操作对象且不构成统一的闭链机构, 所以解决紧协调形势下的双

机器人协调运动控制问题更困难,由于各机器人在消除位置误差时,末端执行器会产生一些力的作用,一部分力用来调整机器人位置,另一部分力会在机器人与被操作物体之间形成内力.如果误差较大,则会在闭链系统中产生巨大的内力,导致被操作物体或搬运机器人扭曲或损坏.

2 双机器人协同系统数学模型

要想协调好双机器人系统作业时的运动必须要建立一个能精确描述包含被操作物体在内的系统整体数学模型.要建立数学模型,首先要对其几何模型进行分析,得出其运动规律生成其物理模型,通过对物体模型中各参数变量之间的关系,确定系统的状态方程和输出方程,得出其动力学特性,即可搭建数学模型.而这个模型既要反映机器人的动力学特性又要包括操作对象的动力学特性.搭建数学模型的过程如图4所示.

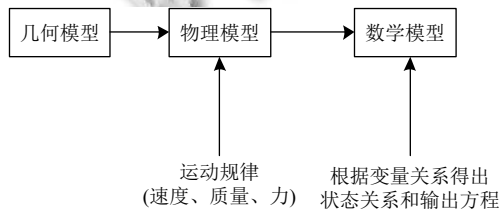


图4 数学模型搭建过程

2.1 机器人运动学关系与动力学特性

对于双机器人协同控制,常采用6自由度垂直型关节机器人.建立单个机器人系统的动力学特性,是建立双机器人协同系统的基础.目前的研究对单个机器人的动力学特性,已经取得了较为统一的标识,如文献[30-34]均采用了如下形式的动力学方程:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) = \tau_i - J_i^T(q_i)F_{ei} \quad (3)$$

其中, $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ 分别为机器人的关节位置、关节速度和关节加速度; $M_i(q_i) \in R^{n \times n}$ 为对称正定惯性矩阵; $C_i(q_i, \dot{q}_i) \in R^{n \times n}$ 为哥氏力与向心力矩阵, $G_i(q_i) \in R^n$ 为重力作用矩阵; τ_i 为机器人各关节的驱动力矩; $J_i(q_i) \in R^{n \times n}$ 为雅克比矩阵.雅克比矩阵是反映机器人关节速度到末端执行器运动速度变换关系的矩阵; $F_{ei} \in R^n$ 为机器人末端的输出作用力.对于一般的工业机器人而言, $n = 6$.

考虑一个含有2个6自由度机器人协同系统,由式(6)可得出双机器人数学模型为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)F_e \quad (4)$$

其中,

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \text{col}(q_1, q_2) \in R^{6 \times 2} \\ \dot{q} = \text{col}(\dot{q}_1, \dot{q}_2) \in R^{6 \times 2} \\ \ddot{q} = \text{col}(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2) \in R^{6 \times 2} \\ M(q) = \text{blockdiag}(M_1(q_1), M_2(q_2)) \in R^{(6 \times 2) \cdot (6 \times 2)} \\ C(q) = \text{blockdiag}(C_1(q_1), C_2(q_2)) \in R^{(6 \times 2) \cdot (6 \times 2)} \\ G(q) = \text{blockdiag}(G_1(q_1), G_2(q_2)) \in R^{(6 \times 2) \cdot (6 \times 2)} \\ \tau = \text{col}(\tau_1, \tau_2) \in R^{(6 \times 2) \cdot (6 \times 2)} \\ J^T(q) = \text{blockdiag}(J_1^T(q_1), J_2^T(q_2)) \in R^{(6 \times 2) \cdot (6 \times 2)} \\ F_e = \text{col}(F_{e1}, F_{e2}) \in R^{6 \times 2} \end{array} \right.$$

在现实环境中应用时,式(4)的许多参数,如惯性、哥氏力与向心力等大多采用估算的方法,难以获得精确数据.由于机器人动力学方程是机器人控制的基础,动力学特性不精确,这就导致机器人在作业过程中有可能出现一些磨损、干扰和噪音,从而影响机器人工作性能或造成一定的破坏.

针对此问题,许多研究者作出了改进,如文献[35]中,顾新兴等基于式(3)的动力学方程引入了一个有界的不确定项 $d_i(q_i, \dot{q}_i, t) \in R^6$, 它表示非精确动力学特性下随时间所受的干扰.利用滑模误差得出其相对各参数的补偿修正量,使整个系统在一定限制条件下具有较好的鲁棒性和动态性能.

另外还有一些研究者通过在控制过程中补偿各参数,如文献[36],Huang等设计了自适应控制器,用以适应机器人工作空间,可以缓解各参数的不确定性.研究动力学方程是为了更精确的控制机器人,从控制效果来看文献[36]较传统方法会更好,也会更精确方便.

2.2 被操作物体动力学特性

目前,大多数双机器人协同控制只考虑了机器人动力学特性,而忽略了被操作物体的动力学特性.为使双机器人协同系统动力学模型更加精确,需对被操作物体进行运动学分析,建立他的动力学模型.工业生产中,常用的被操作对象多为刚性物体,其动力学模型类似于机器人动力学模型,例如文献[37,38].

$$M_0\ddot{x} + C_0\dot{x} + G_0 = F_0 + F_{env} \quad (5)$$

其中, $x \in R^6$ 为被操作对象的质心在世界坐标系的位姿; M_0, C_0, G_0 与式(3)中的对应项含义相同; F_0 为各机器人在被操作物体上的接触力矢量, F_{env} 为环境在被操作物体上的接触力矢量.

当被操作对象在受到外力无形变发生时,式(5)中

的动力学模型成立.但对于一些具有柔性特征的物体^[1],例如布料、书籍等,式(5)不满足其动力学特性,需重新考虑.本文主要针对刚性被操作物体进行分析.

上述式(4)和式(5)分别为机器人动力学模型和被操作物体动力学模型,将两者结合即是整个协同系统的数学模型.

3 双机器人轨迹规划问题

机器人的轨迹,是指操作臂在运动过程中的位移、速度和加速度.轨迹规划是根据作业任务的要求,计算出预期的运动轨迹.轨迹规划的目的是在无碰撞、无奇点条件下,寻找从起始位置到达目标位置的最优路径.路径的优劣取决于规划算法的优劣.依据算法原理,机器人路径规划算法大致分为:传统算法(如Dijkstra算法、LPA*算法、A*算法等)、智能算法(如粒子群优化算法、遗传算法等)和其他算法^[39].由于轨迹规划方法具有通用性,即下述单机机器人或多机器人轨迹规划方法同时可用于双机器人轨迹规划问题做参考.

3.1 传统算法

早在1959年,Dijkstra就提出了Dijkstra(迪杰斯特拉)算法^[40].该算法采用贪心模式,其目的是解决单个节点到另一节点最短路径问题,其主要特点是每次迭代时选择的下一节点是当前节点最近的子节点,即每一次迭代行进的路径最短,在每一次迭代过程中,都要对所有节点之前的最短路径进行更新.近年来,有些学者通过对Dijkstra算法改进,得出了更优化轨迹.李劲等^[41]提出了利用链接图法建立规划环境模型,该论文将规划分为两个层次:用Dijkstra算法求链接图的最短路径,得到初始路径点;用竞赛算法来调整各个初始路径点,得到最优的或近似最优的移动路径点.分析结果表明该方法是有用的.

A*算法是一种启发式搜索算法,即在搜索过程中建立启发式搜索规则,来衡量实时位置与目标位置的距离关系,使搜索方向优先指向目标位置,从而提高搜索效率.

LPA*(life planning A*)算法^[42]是Koenig等在2004年提出的.该算法是基于A*算法的增量启发式搜索算法.张汝波等^[43]针对复杂不确定的作业环境,将基于动态权值LPA*算法与基于威胁的变步长滚动时域预测策略相结合,提出一种规划修复方法.该方法解决了水下机器人在航行过程中遇到突发威胁时规划修复

的问题.

3.2 智能算法

粒子群优化算法^[44]是由Eberhart博士和Kennedy博士发明,是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法.通常认为它是群集智能(swarm intelligence, SI)的一种.粒子群优化算法由于其简单容易实现,目前已经被广泛应用.

段晋军^[45]提出了一种基于面向被操作对象的分层规划算法,采用粒子群优化算法求解被操作对象被操作对象的参考坐标系在世界坐标系的相对位姿,然后根据实际应用规划被操作对象的轨迹.根据被操作对象与机器人末端的约束关系,解出各机器人的运动轨迹.最终得到的轨迹满足焊接机器人船形焊的要求.

与段晋军文章有共通之处的是,潘建龙等^[46]提出了使用遗传算法寻找焊接工件的最优焊接位置,计算出焊接的运动轨迹,根据焊接工件与机器人的运动关系,计算出机器人的运动轨迹.二者都是通过规划被操作对象运动轨迹去规划机器人轨迹.而不同点在于一个采用了粒子群优化算法,另一个采用了遗传算法,两相对比,遗传算法中以前的知识随种群而变化,而粒子群优化算法保存所有好的解的粒子,没有交叉和变异工作,因此粒子群优化算法原理更加简单,参数更少,更易于实现.

Nazarahari等^[47]基于传统遗传算法的基础上,提出了采用5个定值的交叉和变异碰撞算子来改进遗传算法,从而改进路径.

人工势场法是路径规划常用方法之一,是由Khatib提出的一种虚拟力法^[48].它的基本思想是将环境视为一个人造引力场,机器人的运动视为引力场中的运动,定义目标点对机器人有引力作用,障碍物对机器人有排斥力^[49],最后通过两者力结合来控制机器人的运动.因为人工势场法规划轨迹同时保证了避障问题,所以大多轨迹都比较平滑安全,但此方法存在局部最小问题(“死锁”).为克服这一缺点,许多研究者通过将人工势场法与其他算法结合来改善这个问题.

王维^[50]针对机器人路径规划中的势场法的局部最小问题,提出了结合行为策略的人工势场法和势场法结合的综合算法,这可以实现优势互补,同时针对多机器人冲突问题,提出了基于势函数的防碰撞方法.用以质点模型的智能体对改进算法进行实验验证,对比传统势场法,验证其有效性和实用性.

Hassan 等^[51]提出基于能量逼近的人工势场法. 由简化势函数建立三维势图, 使用虚拟障碍法处理局部极小值, 生成地图并实现全局离线路径规划.

王丽^[52]在环境已知的前提下, 提出了基于遗传算法的轨迹规划方法, 利用遗传性算法精确检测率了冲突距离, 并做了改进. 在环境未知的情况下, 提出了人工势场法与多种冲突解决方案. 仿真结果表明此方法的有效性.

3.3 其他算法

李允^[53]根据移动多机器人系统的结构和面临柔性的需求, 提出了多机器人的轨迹规划问题实际可以落脚在任务合理分配问题和防碰撞算法设计问题. 在任务分配问题中, 对比传统单属性指派规则, 采用了多属性指派规则, 通过使用 FCFS、M-FCFS、NAF、M-NAF、DWD、MDWD-R 算法进行实验对比, 得出 MDWD-R 算法的综合性能最好, 且在运行过程中稳定性好, 有较强的鲁棒性. 在防碰撞算法设计问题中, 设计了基于资源申请和释放的防撞算法, 对不同情况下算法对应的局限性提出了等待先行的优化策略、针对地图设计的优化策略, 针对死锁的优化策略. 将优化策略与基于资源申请和释放的防撞算法结合, 就有了改进后的防撞算法, 并通过实验验证了其可靠性.

欧阳帆^[54]为解决双机器人防碰撞问题, 先提出了一种基于八叉树结构的层级式碰撞检测球体模型, 用于检测双机器人的碰撞距离计算和碰撞状态判断问题. 再提出了使用 SAT-SDPD 算法更精确的计算两机器人末端之间发生碰撞和分离的时间, 最短分离距离等. 最后提出了一种改进型速度排斥场模型, 相较于常用的人工势场法不需要力矩驱动, 但此方法在避障轨迹规划中容易出现穿透和陷入局部最小问题.

4 双机器人协同控制系统模型

目前针对双机器人位置/力协调控制的模式大致可以分为 4 种, 主从控制、位置/混合控制、阻抗控制、同步控制. 下面对这 4 种控制方式一一介绍.

4.1 主从控制

主从控制可以分为两类, 一类是 leader-follower 主从控制, 另一类是 master-slaver 主从控制. 如图 5 所示. leader-follower 主从控制是采用纯位置控制. 而 master-slaver 主从控制其控制思路是定义 master 机器人为主机机器人, slaver 为从机器人, 主从之间满足一定的约束

关系. Master 机器人采用基于位置的控制方式, slaver 机器人采用力反馈的控制方式, 从机器人通过六维力/力矩传感器简介获知主机机器人的运动趋势实现对主机机器人的跟随运动. 由于 leader-follower 主从控制方法忽略了对机器人间力控制问题的研究, 容易造成机器人损坏, 或接触工件破坏. 因而常用 master-slaver 主从控制对双机器人进行协同控制, 如文献 [55] 采用 master-slaver 主从协调策略来实现对物体的搬运, 并提出力控制在协调过程中的重要性. 但是这种控制方式需要从机器人具有较强柔性, 能够快速做出响应, 否则可能会导致系统不稳定.

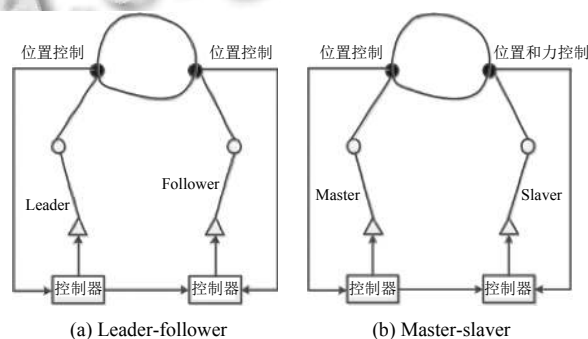


图 5 主从控制方式

4.2 位置/力混合控制

位置/力混合控制, 其控制思想是双机器人控制角色相同, 没有主从之分. 在双机器人位置/力混合控制中, 将各机器人末端的运动进行分解, 通过选择矩阵来实现空间的划分, 在自由空间采用位置控制, 可以实现对期望位置的跟踪. 在约束空间采用力控制, 可以实现对期望力的跟踪^[56-58], 对接触力与期望值的偏差进行补偿. 如图 6 为位置/力混合控制原理图, 在位置/力混合控制结构中, 系统是位置、力控制的双输入双输出, 通过选择矩阵 S 来决定控制方式, S 为 6×6 的对角矩阵, 矩阵元素只能为 0 或 1, I 是 6×6 的单位矩阵, $I-S$ 则为力子空间选择矩阵, 输入 X_d 为期望位置, F_d 为期望力, 输出 q 为机械臂旋转角度, h 为实际接触力. 虽然该控制模式既有位置跟踪又有力的控制, 但该控制模也有其缺点. 如文献 [56,57] 采用位置/力混合控制, 导致在自由空间向约束空间过渡不能保证系统的柔性. 另外该控制方式适用于力矩接口控制的机器人, 而大部分商用的工业机器人并没有提供力矩接口, 因此使用该控制系统有很大的局限性.

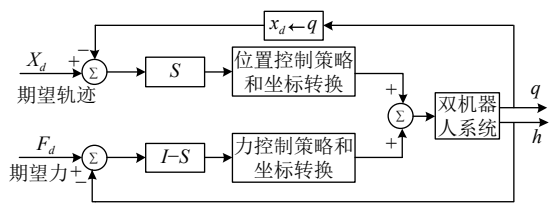


图6 位置/力混合控制结构图

4.3 阻抗控制

1985年, Hogan 提出了阻抗控制^[59], 它是由刚度控制和阻尼控制相结合的一种控制方法. 在实际应用中, 导纳特性与阻抗特性是不可分割的. 导纳控制是输入力输出位置, 阻抗控制是输入位置输出力. 其转换关系如图7. 其中, z 表示阻抗大小, $1/H$ 表示导纳大小, X_d 为期望位置, X 表示实际位置, ΔX 表示期望位置与实际位置之间的位置误差, F_{ext} 表示机器人末端与环境的接触力.

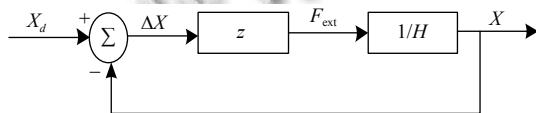


图7 阻抗控制和导纳控制的关系图

由于其简单易实现的优越性, 许多学者对此进行了深入研究, 扩展出了多种更优化方法. 按控制量的不同, 阻抗控制可以分为基于力矩的阻抗控制方法和基于位置的阻抗控制方法.

基于力矩的阻抗控制方法, 是建立关节空间和笛卡尔空间的力/位置转换关系:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (6)$$

$$\tau = J(q)F \quad (7)$$

根据式(4)的机器人动力学模型, 采用如下的控制律:

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - k_v \dot{e} - k_p e) + C(q, \dot{q}) + d(q, \dot{q}) + G(q) \quad (8)$$

其中, e 表示关节位置误差 ($e = q - q_d$), k_p 表示比例系数, k_v 表示微分系数, $J(q)$ 为雅克比矩阵. 基于力矩的阻抗控制需要有一个完整且精确的动力学模型才能实现, 而环境参数大多未知, 且难以精确获得, 因此在实际控制中很少使用此种方法.

基于位置的阻抗控制实际上是一种间接力控制方法, 是以阻抗模型为基础, 通过调整机器人位置误差间接调整机器人末端力, 实现力控制, 其控制原理如图8所示.

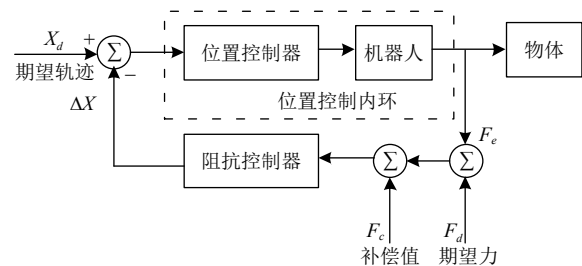


图8 基于位置的阻抗控制结构图

由于基于力矩的阻抗控制方法依赖于精确的机器人动力学模型, 相比而言, 基于位置的阻抗控制方法的使用更广泛, 也易于实现.

4.4 同步控制

同步控制, 是一种基于模型的控制方法, 主要针对期望轨迹跟踪. 如文献[60]在使用同步运动的模式的基础上, 采用自适应的控制策略, 对每个单机器人做轨迹跟踪控制, 使两机器人在同一时刻的位置误差为0. 然而同步控制模式主要做机器人的轨迹跟踪, 对力控制问题有所忽视, 因此此控制模式很少被应用.

4.5 双机器人协同控制方法

常用的双机器人协同控制方法有 PID 控制, 模糊控制, 遗传算法, 强化学习等. 在工业生产应用中, 与单机器人控制相比, 双机器人协同控制较为复杂, 需要处理各机器人之间的约束关系和内力分配等问题. 而单一控制模式和控制方法很难实现对其控制. 因此, 双机器人协同控制多是采用多种控制模式与多种控制方法的控制律相结合的方式完成作业任务.

如 Bonitz 等^[61]提出了面向被操作对象的协调策略, 并对作用于物体的合力进行力分解. Caccavale 等^[62]在文献[49]基础上提出了面向被操作对象的内外阻抗控制策略.

欧阳帆^[54]针对双机器人搬运作业中的内力控制问题, 提出基于遗传算法的阻尼比例微分控制方法. 仿真结果显示使用遗传算法优化 PD 参数后的控制效果相比纯刚度控制最优的控制效果要更好一些.

周扬^[63]提出面向物体的多空间阻抗控制策略, 实现物体阻抗和机器人阻抗融合, 为避免机器人对物体的作用力和物体对环境的作用力过大, 提出自适应阻抗控制方法. 机器人自适应地调整了物体的阻抗参数, 补偿了环境不确定性, 提高了控制精确度. 贺军^[64]提出了变负载的双臂协作机器人双环自适应阻抗控制方面的研究, 设计了基于模型的非线性控制系统. 虽然上述

研究考虑了双臂对物体的内力和外力控制,但是大多都采用定阻抗的控制策略,并没有考虑存在外部干扰和内力约束下的影响。

田献军^[65]提出了基于模糊控制原理与BP神经网络结合的轨迹跟踪控制方法,模糊控制不依赖于精确地数学模型,能够克服操作对象不确定性的影响,但模糊规则的建立和更改都比较有难度,而BP神经网络的自学习能力可以模拟模糊推理,并且在实际应用中可以不断进行修正。实验结果也验证了,虽然刚开始会有一些的超调,但相应速度很快,实际位置会迅速逼近期望位置。

丁楠^[66]针对多机械臂抓取被操作物体,提出了一种基于滑模补偿的力/位混合控制方式,后因滑膜控制常用的抖震问题,提出了基于模糊增益自适应调整的滑模控制,使控制过程更加稳定,达到了更好的控制效果。

潘建龙等^[46]提出了在双机器人搬运工件时采用主从控制模式,主机器人采用位置控制,从机器人采用基于自适应阻抗控制的方法,实现从机器人末端位置误差与力之间的关系的转换,进行位置和力的控制。

段晋军^[45]提出了对称式自适应变阻抗的位置力控制算法,视双机器人与被操作对象为一个闭链系统,根据其约束关系,将机器人末端刘维力矩传感器测得力,分解为外力和内力。外力用来平衡被操作物体动力学以及环境施加在物体上的接触力,即外力是用来进行轨迹跟踪的。内力不会产生任何的运动,用来表述机器人与物体之间的内力,即内力是用来进行力跟踪,保证内力不会对机器人与被操作物体造成损伤和破坏。在内外力进行分配的同时,设定双机器人在 x 、 y 轴使用位置控制,在 z 轴使用力控制,即对双机器人使用混合力位控制的同时,使用力分解阻抗控制。通过实验验证,机器人在无干扰情况下可以按照期望轨迹运动,在有干扰时,会有一些误差,干扰消失后,可以迅速调整回到期望轨迹,表明了其控制极大的柔顺性。

苏越^[67]在双机器人协同中,提出了主从式双臂力位混合控制的控制方法,主机器人采用基于位置的阻抗控制,从机器人采用力位混合控制。最后搭建了实验平台,对双机器人搬运和双机器人拧瓶盖分别进行了实验,验证结果表明该控制方法的有效性。

Perrusquia 等^[68]提出了基于强化学习的阻抗控制方法,利用阻抗控制生成机器人搬运作业中的期望力,在使用强化学习得出最优期望力,进行位置力控制。实验结果表明 $Q(\lambda)$ 算法的学习迭代次数更少,且位置力跟踪效果最好。

除上述之外,还有一些智能控制策略^[69,70]也被用到了协同控制中。这种控制方式依赖于动力学模型,由于存在动力学建模难、控制过程过于复杂、强耦合、非线性等难题,还未应用在现有的控制系统中。

5 研究展望

目前,双机器人协同控制的研究才刚兴起,在动力学分析和控制分析等方面还存在很多问题。通过以上双机器人协同控制的研究综述可以看出,目前的控制方法虽能实现一些简单的作业需求,但仍存在精度不够或协同性能差的问题。为使双机器人协同能更好的实现更复杂任务,本文认为以下问题值得更深入研究。

(1) 被操作物体动力学特性统一化。被操作物体是整个系统很主要的一部分,数学模型是实现控制的基础,建立具有普遍性、合理性的被操作物体动力学模型至关重要。

(2) 双机器人与被操作物体之间的约束关系分析。与单机器人相比,双机器人协同系统最大的难点在于各个之间的运动约束关系,然而这在目前的研究中都有所忽略,或太过简化。这就导致现在的协同无法实现在时间上同步,在空间上约束。因此,双机器人与被操作物体的约束关系将是以后的研究重点和研究基础。

(3) 控制方法的性能评价。目前的控制方法多种多样,许多研究者将各种方法结合对机器人进行控制,虽然通过仿真结果可看出均可实现轨迹跟踪,但控制策略的正确性与合理性缺少评价标准。控制方法的性能评价,对控制策略提供了评价准则,为实际应用提供了保障,具有重要意义。

(4) 智能控制的应用。智能控制是未来机器人控制的一个大趋势。由于双机器人作业环境的易变性和不可预见性,为实现机器人智能决策能力,应从传统的机器学习,迈向深度学习和强化学习,通过多次学习寻求最优行动。机器人在学习过程,对不好的行动及时报警提示,对优化的行动保存并继续执行,实现机器人的自适应性和安全保障。

随着双机器人协同技术的不断发展,在未来一定会有更广阔的市场应用。

参考文献

- 1 Zivanovic MD, Vukobratovic MK. Multi-Arm Cooperating Robots: Dynamics and Control. Springer Science & Business Media, 2005.

- 2 顾新兴, 孙燕朴, 冯纯伯. 多机器人协调系统研究综述. 系统工程与电子技术, 1994, (12): 9-20.
- 3 周东健, 张兴国, 李成浩. 多机器人系统协同作业技术发展近况与前景. 机电技术, 2013, 36(6): 146-150.
- 4 Dickson WC. Experiments in cooperative manipulation of objects by free-flying robot teams [Ph.D. Thesis]. Stanford: Stanford University, 1994.
- 5 Jou YT. Human-robot interactive control [Ph.D. Thesis]. Ohio: Ohio University, 2003.
- 6 Bererton CA. Multi-robot coordination and competition using mixed integer and linear programs [Ph.D. Thesis]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2004.
- 7 高为炳. 多机器人系统的动力学与协调控制. 控制与决策, 1992, 7(3): 161-168.
- 8 杜兆才, 邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. 航空制造技术, 2009, (24): 88-91.
- 9 Basile F, Caccavale F, Chiacchio P, *et al.* Task-oriented motion planning for multi-arm robotic systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(5): 569-582.
- 10 Damaren CJ. An adaptive controller for two cooperating flexible manipulators. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(1): 15-21.
- 11 Cetin AE, Adli MA. Cooperative control of a human and a robot manipulator for positioning a cart on a frictionless plane. Mechatronics, 2006, 16(8): 461-469.
- 12 Tarn TJ, Bejczy AK, Yun X. Dynamic coordination of two robot arms. Proceedings of the 25th IEEE Conference on Decision and Control. Athens: IEEE, 1986. 1267-1270.
- 13 Liu CA, Wu KH, Xu V. Coordinated control of multiple free-floating space robotic system. Proceedings of 2005 IEEE International Conference Mechatronics and Automation. Niagara Falls: IEEE, 2005. 357-361.
- 14 Li ZJ, Ge SS, Wang ZP. Robust adaptive control of coordinated multiple mobile manipulators. Mechatronics, 2008, 18(5-6): 239-250.
- 15 Gardner JF, Velinsky SA. Kinematics of mobile manipulators and implications for design. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(6): 309-320.
- 16 吴军, 徐昕, 连传强, 等. 协作多机器人系统研究进展综述. 智能系统学报, 2011, 6(1): 13-27.
- 17 陈忠泽, 林良明, 颜国正. 基于 MAS (Multi-Agent System) 的多机器人系统: 协作多机器人学发展的一个重要方向. 机器人, 2001, 23(4): 368-373.
- 18 石志国, 王志良, 刘冀伟. 异构多机器人协作系统研究进展. 智能系统学报, 2009, 4(5): 377-391.
- 19 王森. 基于主被动柔顺的机器人轴孔精密装配技术研究 [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- 20 郑养龙. 基于力传感器的双臂机器人轴孔柔顺装配策略与方法研究 [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- 21 欧阳帆, 张铁, 陈杨. 用于机器人轴孔装配的主-被动结合柔顺装置. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2016, 44(7): 61-69.
- 22 赵娜, 岳建锋, 李亮玉, 等. 双机器人主从协调焊接的路径规划算法. 焊接学报, 2015, 36(3): 67-70.
- 23 张荣. 双机器人焊接协同作业轨迹规划 [硕士学位论文]. 广西科技大学, 2019.
- 24 李盼盼, 赵浩. 基于遗传算法的机器人焊接训练辅助系统研究. 山西大同大学学报 (自然科学版), 2020, 36(5): 87-92.
- 25 张磊, 王威. 双机器人协同搬运运动学分析及路径规划. 机械工程与自动化, 2020, (2): 89-91, 94.
- 26 姚钢. 工业机器人搬运作业的轨迹规划研究. 南方农机, 2020, 51(23): 27-30.
- 27 包翔宇, 曹皓清, 卫昌辰, 等. 协同搬运工业机器人系统运动学分析与工况仿真. 现代机械, 2020, (1): 1-4.
- 28 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应 [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 29 von Albrichsfeld C, Tolle H. A self-adjusting active compliance controller for multiple robots handling an object. Control Engineering Practice, 2002, 10(2): 165-173.
- 30 Owen WS, Croft EA, Benhabib B. A multi-arm robotic system for optimal sculpting. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(1): 92-104.
- 31 张兴国, 张柏, 唐玉芝, 等. 多机器人系统协同作业策略研究及仿真实现. 机床与液压, 2017, 45(17): 44-51.
- 32 Zribi M, Karkoub M, Huang LL. Modelling and control of two robotic manipulators handling a constrained object. Applied Mathematical Modelling, 2000, 24(12): 881-898.
- 33 Liu JF, Abdel-Malek K. Robust control of planar dual-arm cooperative manipulators. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2000, 16(2-3): 109-119.
- 34 Wang J, Dodds SJ, Bailey WN. Co-ordinated control of multiple robotic manipulators handling a common object—Theory and experiments. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 1997, 144(1): 73-86.
- 35 顾新兴, 叶桦, 冯纯伯, 等. 基于模型偏差补偿原理的机器人双臂协调控制. 控制理论与应用, 1993, 10(1): 21-28.
- 36 Huang HP, Chen RS. Modeling and adaptive coordination control of a two-robot system. Journal of Robotic Systems, 1992, 9(1): 65-92.
- 37 Derventzis CA, Davison EJ. Robust motion/force control of cooperative multi-arm systems. Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice: IEEE, 1992. 2230-2237.
- 38 Wen JT, Kreutz-Delgado K. Motion and force control of multiple robotic manipulators. Automatica, 1992, 28(4): 729-743.
- 39 张广林, 胡小梅, 柴剑飞, 等. 路径规划算法及其应用综述.

- 现代机械, 2011, (5): 85–90.
- 40 Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269–271.
- 41 李劲, 吕文阁, 侯梦华. 基于竞选算法的移动机器人路径规划. *机床与液压*, 2009, 37(1): 30–31, 68.
- 42 Koenig S, Likhachev M, Furcy D. Lifelong planning A*. *Artificial Intelligence*, 2004, 155(1–2): 93–146.
- 43 张汝波, 刘园园, 苏航, 等. 自主式水下机器人规划修复方法. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(S1): 81–84.
- 44 Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, 1995. 39–43.
- 45 段晋军. 多机器人协作焊接中的轨迹规划和位置力协调控制研究 [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- 46 潘建龙, 甘亚辉, 陈明, 等. 多机器人协作焊接系统初始焊接位置选取及最优轨迹规划. 第36届中国控制会议论文集. 大连: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2017. 7.
- 47 Nazarahari M, Khanmirza E, Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 2019, 115: 106–120.
- 48 Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Louis: IEEE, 1985. 500–505.
- 49 张波涛, 刘士荣, 董德国. 基于栅格-几何混合地图的移动机器人分层路径规划. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(5): 621–626.
- 50 王维. 基于多智能体系统的多机器人路径规划方法研究及应用 [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- 51 Hassan AM, Elias CM, Shehata OM, *et al.* A global integrated artificial potential field/virtual obstacles path planning algorithm for multi-robot system applications. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, 4(9): 1198–1204.
- 52 王丽. 移动机器人路径规划方法研究 [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- 53 李尤. 多机器人路径规划算法研究 [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2017.
- 54 欧阳帆. 双机器人协调运动方法的研究 [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- 55 Smith C, Karayiannidis Y, Nalpanidis L, *et al.* Dual arm manipulation—A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(10): 1340–1353.
- 56 Uchiyama M, Dauchez P. A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots. *Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 1988. 350–356.
- 57 Uchiyama M, Dauchez P. Symmetric kinematic formulation and non-master/slave coordinated control of two-arm robots. *Advanced Robotics*, 1992, 7(4): 361–383.
- 58 Ren Y, Chen ZS, Liu YC, *et al.* Adaptive hybrid position/force control of dual-arm cooperative manipulators with uncertain dynamics and closed-chain kinematics. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(17): 7767–7793.
- 59 Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1985, 107(1): 1–7.
- 60 Sun D, Mills JK. Adaptive synchronized control for coordination of multirobot assembly tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(4): 498–510.
- 61 Bonitz RG, Hsia TC. Force decomposition in cooperating manipulators using the theory of metric spaces and generalized inverses. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Diego: IEEE, 1994. 1521–1527.
- 62 Caccavale F, Chiacchio P, Marino A, *et al.* Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(5): 576–586.
- 63 周扬. 双臂机器人的控制系统建立及阻抗控制研究 [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- 64 贺军. 变负载双臂机器人阻抗自适应控制系统研究 [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- 65 田献军. 多机器人体系结构与轨迹跟踪的研究 [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- 66 丁楠. 多机械臂系统协调控制研究 [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- 67 苏越. 双臂协作机器人协调操作与柔顺控制方法研究 [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- 68 Perrusquía A, Yu W, Soria A. Position/force control of robot manipulators using reinforcement learning. *Industrial Robot*, 2019, 46(2): 267–280.
- 69 Gueaieb W, Karray F, Al-Sharhan S. A robust adaptive fuzzy position/force control scheme for cooperative manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(4): 516–528.
- 70 Gueaieb W, Karray F, Al-Sharhan S. A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(2): 109–125.