

文章编号: 1002-0446(2003)05-0465-05

移动机械手控制研究进展*

宋佐时, 易建强, 赵冬斌

(中国科学院自动化研究所 复杂系统与智能科学实验室 北京 100080)

摘要: 我国在移动机械手方面所作的工作相对较少, 本文针对移动机械手, 重点从运动规划、协调控制和多移动机械手三个方面综述了近年来的发展状况, 介绍了涉及的各种问题及相应的处理方法, 同时探讨了这一研究领域的发展方向和需要解决的问题。

关键词: 移动机械手; 运动规划; 协调控制; 多移动机械手

中图分类号: TP24 文献标识码: B

SURVEY OF THE CONTROL FOR MOBILE MANIPULATORS

SONG Zuo - shi, YI Jian - qiang, ZHAO Dong - bin

(Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper discusses the development of mobile manipulators in recent years in the aspects of motion planning, coordinating control and multiple mobile manipulator coordination, and presents various problems involved and the methods to deal with them. Meanwhile, the paper discusses future development and problems in this field.

Keywords: mobile manipulator; motion planning; coordinating control; multiple mobile manipulators

1 引言 (Introduction)

移动机械手是由一个或若干个机械手和一个可移动平台组成, 机械手安装在移动平台上, 这种结构使机械手拥有几乎无限大的工作空间和高度的运动冗余性, 并同时具有移动和操作功能, 这使它优于移动机器人和传统的机械手; 另一方面, 移动平台和机械手不但具有不同的动力学特性, 而且存在强耦合, 有的移动平台还受非完整约束。因此, 研究这类系统的控制问题有十分重要的理论价值和实践意义。

移动机械手的控制问题是近年来控制界研究的热点和难点, 我国在这方面的研究工作刚刚起步。对于移动机械手控制方面的研究主要分两大类: 一类是移动平台和机械手的运动规划问题; 另一类是移动平台和机械手的协调控制问题。对一个给定的工作任务, 确定机械手和平台的运动路线是首要问题。规划工作完成以后, 就要采用适当的算法进行控制, 因为移动机械手涉及到平台和机械手两个子系统, 如何协调控制至关重要。此外, 多个移动机械

手协同完成任务也有许多实际应用。

2 移动机械手运动规划 (Motion planning of mobile manipulators)

所谓规划是指在具有障碍物的环境中按照一定的评价标准, 寻找一条从起始状态(包括位置及姿态)到目标状态(包括位置及姿态)的无碰路径。对移动机械手而言, 规划问题涉及机械手规划和平台规划两部分。平台和机械手的组合使系统具有冗余性, 对同一个任务, 既可以通过单独运动机械手或平台实现, 也可以同时运动机械手和平台来实现。此外移动机械手系统具有复杂的动力学模型、强动力学耦合以及移动平台可能引入的非完整约束, 这些都使移动机械手的规划问题备受关注, 本文介绍现有的规划方法。

早期的移动机械手规划方法都没有充分发挥移动机械手的能力或没有考虑移动机械手完整的动力学模型。有的只限于实现移动或操作一种功

* 基金项目: 中国科学院科技创新百人引进计划项目资助。

收稿日期: 2003 - 01 - 25

能^[1-2],有的则忽略动力学特性^[3-4]。Yamamoto^[1]提出保持机械手可操作度最大的区域为首选操作区(Preferred Operation Region),通过规划平台的运动使机械手处于首选操作区;Seraji^[2]把移动平台引入的自由度和多关节引入的自由度同等对待,将整个系统视为一个冗余机械手,对其进行在线规划;Carrier^[3]提出用准则函数将移动机械手规划问题转化为通用的优化问题,对移动平台和机械手利用不同的代价函数单独寻优,采用模拟退火的方法得到近似最优解。文[4-5]提出的优化准则更进一步,考虑了移动平台的运动代价、机械手的运动代价和机械手偏离优化位姿时所需的运动代价,采用遗传算法求解。Foulon^[6]给出了移动平台和机械手的点点规划算法,但忽略了动力学因素。文[7]的规划问题包括计算平台的运动控制和机械手的关节位置控制,控制末端在指定时间内达到任务空间中一个合理的位姿,针对一种普通的移动机械手,提出了三种雅克比运动规划算法。Tanner^[8]利用全部状态的不连续反馈控制律和势场函数实现了平台的规划,但要求势场方向和平台的可行方向一致。

由于移动机械手是十分复杂的多输入多输出非线性系统,具有时变、强耦合的非线性动力学特征,因此在规划时必须考虑系统的动力学特性。在机械手期望轨迹给定条件下,Akira^[9]采用基于梯度函数的分层叠代算法进行函数寻优,实现了移动平台的规划;文[10]给出的基于事件的在线运动规划方法适合于点对点规划、多个分块操作和遥操作(Teleoperation)。Huang^[11]分别给出了考虑机械手位姿实现移动平台的运动规划方法和考虑到移动平台稳定性实现机械手的运动规划方法。因而,形成了考虑到车体动力学、机械手操作空间和系统稳定性的平台运动的最优规划方法。

移动机械手规划是一个富有挑战性的课题。平台受到非完整约束的性质使非完整系统的规划方法大多数可用于移动平台的规划,这部分内容可参考文[48-49]。

3 移动机械手的协调控制 (Coordinating control of mobile manipulators)

移动平台和机械手的组合首先要求有效的协调移动和操作。对有的平台而言,由于轮子和地面之间的纯滚动引入的非完整约束使平台的运动方向受到限制。多连杆机械手和平台的结合造成了整个系统的冗余性,冗余度的求解是协调控制遇到的第一

问题;同时,移动平台和机械手都有复杂的动力学模型,且二者之间存在强耦合,此外,移动平台一般质量重,动力学响应慢;而机械手质量轻,动力学响应快。这些问题在设计协调控制器时必须考虑的因素。

机器人的控制研究基本上跟踪了控制理论的发展动态,对于移动机械手而言,从控制方法可分为两大类:(1)将系统分为机械手和移动平台两部分处理;(2)将机械手和平台作为一个整体来看待;从处理方法上看,涉及到:(1)是否考虑动力学耦合;(2)考虑耦合时是否对耦合加以补偿;(3)系统的稳定性问题;(4)平台和机械手的运动形式;(5)是否考虑机械手末端执行器的力控制问题。上面各种情况是彼此交织在一起的,下面由简到繁加以综述。

人们研究每一种控制问题时,一般都首先考虑最简单的情况,移动机械手也是如此。Wiens^[12]研究了单杆机械臂通过转动关节与不运动的平台相联接的情况,讨论了平台动力学对机械臂操作性能的影响;随后对该模型利用被动控制减小了平台运动对于机械手控制的影响,但没有考虑平台的控制^[13]。而文[1]假设机械手已经示教完好,通过控制平台使机械手处于首选操作区并保持最佳位姿,扩大了机械手的操作空间;文[14]在其基础上结合力控制,使机械手末端跟踪一个运动物体的表面。Lee^[15]为平台选择了一个安全区(Safety Region),当平台的重心在安全区内部时,平台保持静止不动,一旦平台的重心处于安全区边界,平台开始运动,并保持机械手的初始位姿,控制器类似于质量-阻尼-弹簧系统的设计,上述几种方法的实质都是仅考虑一个子系统的控制。

控制器的设计过程就是对被控对象的数学模型的理解过程,因此基于模型的控制即计算力矩控制是十分有效的,但要求系统精确的数学模型^[16]。由于移动机械手是十分复杂的非线性系统,难以得到精确的动力学模型,而且在实际操作中要受到诸如摩擦力、外界扰动等许多不确定性因素的影响,在控制器设计时,如果忽略这些因素,控制性能难免要受影响。对此问题,许多学者作了很有意义的工作,Evangelos^[17]利用计算力矩控制的思想实现了对受外部扰动的移动机械手跟踪控制;Liu^[18]提出了一种分散控制策略,将机械手和移动平台看作两个独立的系统,分别设计了控制器,把系统的动力学耦合和未知不确定性都看成外扰,在有界情况下实现系统的渐近稳定,但只考虑了平台的平动。在不需要系统

动力学先验知识和不确定性的前提下, Sheng^[19]提出的鲁棒阻尼控制算法只需要很少的控制参数, 而且控制器是同系统特性无关的, 通用的鲁棒阻尼控制器可以应用在不同的移动机械手系统中; 文[20]为两个子系统各设计一个基于神经网络的控制器, 神经网络用来在线估计系统的动力学耦合、参数和非参数不确定性, 实现了移动机械手关节空间定位控制; Chung^[21]利用非线性交互控制算法进行运动学冗余度求解, 实现了两个控制器的协调, 对机械手设计了鲁棒自适应控制器, 对平台设计了 10 线性化控制器。在移动机械手的工作空间中, 存在障碍物是难免的, Yamamoto^[22]假设机械手期望轨迹上存在障碍物, 并将障碍物用超二次型势场函数代替, 机械手子控制器实现了避障; Ogren^[23]假设移动平台的运动轨迹上存在障碍物, 根据平台、机械手末端执行器、障碍物之间的距离为切换面, 分别设计了变结构控制器, 不但实现了避障, 而且平台和机械手距离可任意设置, 同时轨迹跟踪误差可以任意小。

前面叙述的分散控制固然使控制器设计变得简单, 但由于子系统之间的耦合, 控制精度必然要受影响。因此很多学者把移动平台和机械手看成一个整体研究系统的协调控制问题。文[2]建立了移动机械手统一的运动学模型, 提出了配置控制(Configuration Control)策略, 基本思想是利用冗余性完成一系列用户定义的附加任务, 平台的非完整约束和运动学冗余性看为新任务的约束, 在理论上证明了平台的引入提高了机械手的可操作度; Tan^[10, 24]建立了移动机械手统一的动力学模型, 一方面, 用非线性负反馈对该模型进行了线性化和解耦, 利用基于事件的控制方案完成了移动机械手的协调控制, 运动学的冗余度用来同时控制力和位置, 保证了存在未知的障碍物时整个系统的稳定性^[10]; 另一方面, 利用运动学冗余度使力和位置控制解耦且处在同一个方向上, 同时分析了冗余和非冗余机器人力控制的区别, 实现了用移动机械手推动一个受非完整约束的小车的控制^[24]。一般移动机械手的任务只是对机械手末端给定, 平台仅起到定位作用, 但在某些特殊场合, 不但要求机械手按照期望的轨迹运动, 同时要求平台按给定移动, 这种控制问题更具复杂性。Dong^[25-28]在考虑了动力学耦合的情况下, 设计了基于 Lyapunov 稳定性理论的鲁棒控制器^[25], 此外还分别给出系统惯性参数不精确已知^[26]和系统受到摩擦力、外部扰动、参数不确定性^[27-28]两种情况的鲁棒控制器设计方法, 都保证了全部状态渐近跟踪期望

轨迹。为提高跟踪性能, 进一步设计出使跟踪误差指数收敛的控制器。Jagannathan^[29]假定动力学未知, 通过构造一个离散的模糊逻辑系统逼近整个系统的动力学模型, 实现平台和机械手全部状态的位置和速度跟踪, 克服了动力学耦合和外部扰动的影响, 同时考虑了系统的稳定性, 但需要满足持续激励条件。文[30]研究了比较复杂的情况——两个机械手在一个平台上协调执行任务, 提出任务空间椭球体的概念, 该椭球不但可以反映平台和机械手对任务所作的贡献, 而且它的形状可以反映平台所受的约束, 给出了冗余度的求解。Kang^[31]研究了惯性力对机械手姿态控制的影响, 作为移动机械手冗余度求解的一种方法, 提出了操作空间中机械手末端惯性有效性的概念, 通过空移动改变有效的惯性, 获得移动机械手衰减的惯性量, 对减少同环境碰撞的冲击力有重要作用。

机械手和移动平台之间的动力学耦合问题对于系统的性能有较大的影响。Tan^[10]提出了一种扩展雅可比矩阵转换方法补偿了动力学耦合, 但需要动力学先验知识, Yamamoto^[32]不但推导出考虑耦合时系统的动力学模型, 而且利用非线性反馈对耦合进行集中补偿, 通过仿真说明平台运动引起的对机械手的补偿力对跟踪精度有较大的影响, 而机械手运动引起的对平台的补偿力不能明显地减小跟踪误差, 这个仿真结果验证了平台的动力学响应比机械手慢的事实。

控制器设计中最重要的问题之一就是稳定性, 一个理论上不稳定地系统是不可实现的。移动机械手的稳定性问题是相当复杂的, 因为不但需要平台稳定移动, 同时需要机械手稳定的执行任务, 即要求操作和稳定的结合, 在保证协调控制时必须保证系统的稳定性。早期人们只通过控制平台重心位置研究系统的静态稳定性^[33-34]; Yoneda^[35]和 Dubowsk^[36]通过控制平台和地面的相互作用力, 讨论了系统的动态稳定性, 但这种方法无法实现离线规划, 因为离线时很难知道平台与地面作用力的大小。Huang 对于此问题进行了深入研究, 首先考虑平台运动时调整机械手使系统稳定的情况^[37]; 随后把零力矩点 ZMP (Zero Moment Point, 机器人所受的地面反力对该点的合力矩为零的点) 的概念加以扩展, 提出了有效稳定区 (Valid Stable Region) 的概念, 评价了存在外界干扰时移动机械手的稳定性^[11]; 进一步给出了稳定补偿范围 (Stability Compensation Range) 的概念^[38], 保证了系统在执行一个完整任务

时,通过改变机械手姿态使系统稳定。不但可以使系统稳定时机械手跟踪给定轨迹,而且在系统不稳定时可以镇定系统。

4 多移动机械手的规划与协调控制 (Planning and coordinating control of multiple mobile manipulators)

移动机械手的出现扩大了机械手的操作空间,扩展了机械手的应用领域,具有更强的操作能力。如果多个移动机械手或人与移动机械手相互协调完成如抓取、运送物体等复杂任务,那么将提高生产自动化程度,将人从繁重的体力劳动中解放出来,因此,多移动机械手协调无论在理论研究还是实际应用中具有很重要的价值。这里简单介绍这方面的研究工作。

针对人和移动机械手协调控制问题。Yamamoto^[39]对机械手采用力控制和动力学补偿相结合的方法,对非完整平台采用 IO 线性化控制器,实现了在没有物体运动轨迹先验知识情况下的人和机械手协调搬运物体的控制;Fernandez^[40]进一步研究了移动机械手和人的主动合作模块设计,实现了利用移动机械手的目标识别能力搬运物体到人的位置。Agah^[41]针对人和移动机械手完成交换物体这个实际问题,提出了一种竞争控制结构,思想是定义一系列控制器,根据实际需要执行的任务,这些控制器通过竞争使得其中一个发出控制信号,实现对移动机械手的控制。这些控制器是根据可能发生的任务应用模糊控制预先设计好的。文[42]考虑的是两个移动机械手实现协调工作,保证彼此不碰撞而且避免每个机械手出现奇异位置。文[43]重点考虑的是人和机械手共同合作中的人身安全问题。

对于两个或两个以上的移动机械手协调完成搬运物体的任务主要涉及到以下几个问题:(1)机械手必须保持一个适当的控制力作用在物体上;(2)不同的机器人之间要有效地进行信息的共享和传递;(3)不同机器人的控制器应该是独立的;(4)机器人之间应该有效协调并对位置和模型误差有鲁棒性。基于行为的控制算法是行之有效的^[44],但在机器人之间存在强耦合时不能实现期望的性能。因此,许多学者提出了若干可行方法:Desai^[45]利用一个集中规划器对两个平台进行规划,以开环的形式控制平台的速度,保证机械手稳定抓取物体,规划器和控制器的设计都转化为最优问题,但该方案无法实现机械手末端力控制的鲁棒性;Sugar^[46]将多移动机械手中的

一个看成主机器人,其他的看作从机器人,主机器人根据传感器信息完成整个多机器人组的路径规划和力规划并跟踪期望轨迹,从机器人按主机机器人的指令进行运动,实质是一种多移动机器人的分散规划与控制算法;文[47]在其基础上建立了移动机械手的协调框架和控制算法,每个机器人都有独立的控制器和自主性,机器人之间的协调通过传感器和通讯来完成,机器人可以通过协作在一个比较拥挤的环境中搬运物体,且具有自主导航能力。

5 进一步研究方向 (Future research problems)

移动机械手控制在理论与应用研究上取得了很多成果,但在某些方面仍不令人满意,因此现存的问题也正是该领域的研究方向。

从控制器设计上看:移动机械手具有十分复杂的动力学模型,控制器的设计必须考虑完整的动力学模型,包括环境变化、未知外扰、避障等不确定性因素,否则得到的控制器将不能达到期望的性能指标。从处理方法上看:如采用代价函数法解决规划问题,应该根据不同的任务选择不同的代价函数,用不同的寻优方法找到期望解;此外,用智能控制方法设计移动机械手控制器的文献不是很多,可以考虑使用。从控制目标上看:设计的控制器应该充分发挥移动机械手移动和操作相结合的优势,使机械手和平台同时运动来完成任务。另外,现有许多规划和控制方法只是通过计算机仿真验证了可行性,没有在实际的移动机械手系统上试验,因此,移动机械手的控制问题还有许多有待完成的工作,特别是在国内还没有实际的移动机械手系统。

总之,移动机械手控制的研究,将随着高速度、高精度机器人的开发应用,及控制理论、信号处理等众多相关学科的发展和对移动机械手动力学的进一步了解,而不断的深入。

参考文献 (References)

- [1] Yamamoto Y, Yun X P. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator [A]. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control [C]. 1992. 2643 - 2648.
- [2] Seraji H. Motion Control of mobile manipulators [A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. 1993. 2056 - 2063.
- [3] Carriker W F, Khosla P K, Krogh B H. Path planning for mobile manipulators for multiple task execution [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 403 - 408.
- [4] 张硕生,余达太.轮式移动机械手的点一点运动规划方法[J].北

- 京科技大学学报, 2001, **23**(1): 81 - 84.
- [5] 张硕生, 余达太. 轮式移动机械手的多点运动规划方法[J]. 北京科技大学学报, 2001, **23**(2): 177 - 180.
- [6] Foulon G, Fourquet J Y, Renaud M. Planning point to point paths for nonholonomic mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 1998. 374 - 379.
- [7] Tchouk K, Jakubiak J, Muzyński R. Regular jacobian motion planning algorithms for mobile manipulators[A]. IFAC[C]. 2002.
- [8] Tanner H G, Kyriakopoulos K J. Nonholonomic motion planning for mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 2000. 1233 - 1238.
- [9] Akira M, Seiji F, Yamamoto M. Trajectory planning of mobile manipulator with end - Effector's specified path[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 2001. 2264 - 2269.
- [10] Tan J D, Xi N. Unified model approach for planning and control of mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 2001. 1 - 8.
- [11] Huang Q, Tanie K, Sugano S. Coordinated motion planning for a mobile manipulator considering stability and manipulation[J]. International Journal of Robotics Research, 2000, **19**(8): 732 - 742.
- [12] Wiens G J. Effects of dynamics coupling in mobile robotic system [A]. Proceedings of World Conference on Robotic Systems[C]. 1989: 43 - 57.
- [13] Wiens G J, Jang W M. Passive joint control of dynamic coupling in mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1994, **13**(3): 209 - 220.
- [14] Yamamoto Y, Yun X P. Control of mobile manipulators following a moving surface[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1993. 1 - 6.
- [15] Lee H K, Takubo T, Arai H, *et al.* Control of mobile manipulators for power assist systems[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, **17**(9): 469 - 477.
- [16] Jagannathan S, Zhu S Q. Path planning and control of a mobile base with nonholonomic constraints[J]. Robotica, 1994(12): 529 - 540.
- [17] Evangelos P, John P. Planning and model - based control for mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 2000. 1810 - 1815.
- [18] Liu K, Lewis F L. Decentralized continuous robust controller for mobile robots[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1990. 1822 - 1827.
- [19] Sheng L, Goldenberg A A. Robust damping control of mobile manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2002, **32**(1): 126 - 132.
- [20] Sheng L, Goldenberg A A. Neural - network control of mobile manipulators[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, **12**(5): 1121 - 1133.
- [21] Chung Jae H, Velinsky Steven A, Hess R A. Interaction control of a redundant mobile manipulator [J]. International Journal of Robotics Research, 1998, **17**(12): 1302 - 1309.
- [22] Yamamoto Y, Yun X P. Coordinated obstacle avoidance of a mobile manipulator[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1995. 2255 - 2260.
- [23] Ogren P, Egerstedt M, Hu X. Reactive mobile manipulation using dynamic trajectory Tracking[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 2000. 3473 - 3478.
- [24] Tan J D, Xi N, Wang Y. Hybrid force/position control of redundant mobile manipulators[A]. IFAC[C]. 2002.
- [25] Dong W J, Xu Y S, Wang Q. On tracking control of mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 2000. 3455 - 3460.
- [26] 董文杰, 徐文立. 移动机械手的跟踪控制[J]. 控制与决策, 2001, **16**(6): 914 - 917.
- [27] 董文杰, 徐文立. 移动机械手的鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2002, **19**(3): 345 - 348(英文).
- [28] 董文杰, 徐文立. 不确定非完整移动机械手的鲁棒控制[J]. 清华大学学报, 2002, **42**(9): 1261 - 1264.
- [29] Jagannathan S. Discrete - time fuzzy logic control of a mobile robot with an onboard manipulator[J]. International Journal of Systems Science, 1997, **28**(12): 1195 - 1209.
- [30] Yamamoto Y, Yun X P. Unified analysis on mobility and manipulability of mobile manipulators[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1999. 1200 - 1206.
- [31] Kang S, Komoriya K, Yokoi K, *et al.* Reduced inertial effect in damping - based posture control of mobile manipulator[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 2001. 488 - 493.
- [32] Yamamoto Y, Yun X P. Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, **12**(5): 816 - 824.
- [33] Ghosempoor S. A measure of stability for mobile manipulator[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1995. 2249 - 2254.
- [34] Rey D A, Papadopoulos E G. On - line automatic tipover for a mobile manipulator[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 1997. 1273 - 1278.
- [35] Yoneda. K. Tumble stability criterion of integrated locomotion and manipulation[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 1996: 870 - 876.
- [36] Dubowsky S. Planning mobile manipulator motions considering vehicle dynamic stability constraints[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1989. 1271 - 1276.
- [37] Sugano S. Stability control for mobile manipulator using potential method[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 1994. 839 - 846.
- [38] Huang Q, Sugano S, Tanie K. Stability compensation of a mobile manipulator by manipulator motion: Feasibility and Planning[A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. 1997. 1285 - 1292.