

机械系统同步控制方法研究进展

赵东亚¹, 赵永瑞², 崔宝华³, 张 兰¹

(1. 中国石油大学 化学工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 青岛 266580;
3. 青岛美光机械有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要:大规模制造业需要多个机械设备进行协作完成生产任务, 高精密设备需要多个运动部件协调运动。同步控制是促进机械系统相互协作的有效手段, 也是学术界和工业界关注的热点问题。对需要同步控制的机械系统进行分类, 阐述了每一类机械系统同步控制方法的研究动态, 并对其特点进行了分析与总结。

关键词:机械系统; 多机械臂系统; 并联机器人; 多智能体系统; 同步控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)03-0001-06

Synchronized Control for Mechanical Systems

Zhao Dongya¹, Zhao Yongrui², Cui Baohua³, Zhang Lan¹

(1. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;
2. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;
3. Qingdao Meiguang Machinery Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: In large-scale manufacturing, multiple machineries are required to work in a cooperative manner; in high-precision machineries, the moving parts are required to work coordinately. The synchronized control approach is an effective solution to the cooperation of mechanical systems, so it has become a hot issue in academia and industry. In this paper, mechanical systems were classified according to their kinematics and dynamics, and then the synchronized control approaches proposed for each type were summarized in detail.

Key words: mechanical system; multiple robotic manipulators system; parallel robotic manipulator; multi-agent system; synchronized control

现代制造业规模不断扩大,任务越来越复杂,精度要求也越来越高。在许多情况下,单个机械设备难以完成复杂、高精度的生产任务。而多个机械设备或运动部件同步运动能够有效解决这类问题。典型的应用包括多机械臂协作安装或加工设备、多轴联动机床生产、多移动机器人协调勘探等^[1-5]。同步控制方法是保证机械系统同步运动的关键手段,近年来取得了较大进步,成为研究的热点问题^[6-10]。不同类型的机械系统,其运动学和动力学性质相差甚远,与之相应的同步控制算法具有较大差异。需要指出的是,作为一种控制算法,机械系统同步控制在设计过程中又具有一些共性,如同步误差的定义方法以及同步控制算法的设计思路等。按照动力学与运动学性质,典型的同步运动机械系统可分为多机械臂系统、并联机器人、移动机器人编队和多智能体系统^[11-14]。上述机械系统具有很好的代表性,本文分别对其同步控制算法进行分析与总结,基本涵盖了现有机械系统同步控制方法,对未涉及的机械系统也有一定的启发意义。

收稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61004080, 61273188); 山东省自然科学基金项目(ZR2011FM003, ZR2011EEQ023); 山东省泰山学者建设经费项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目; 青岛市经济技术开发区重点项目(2011-2-52)

作者简介: 赵东亚(1975—), 男, 山东济宁人, 副教授, 博士, 主要从事机械系统同步控制、机器人控制及非线性系统控制等方面的研究。E-mail: dyzhao@upc.edu.cn; dongyazhao@gmail.com

1 多机械臂同步控制方法

多机械臂系统在汽车生产、复杂设备加工和装配、大型设备安装等领域得到广泛应用。其中,多个机械臂需要协同运动,传统协调控制往往需要测量内力,在应用中具有一定的局限性^[11-14]。同步控制能够有效解决多机械臂的协调运动问题而无需测量内力,近年来取得较大进展。多机械臂系统是一类典型的非线性强耦合系统,这类系统的同步控制器设计具有相当的挑战性,当存在系统不确定性和外部干扰时,控制器设计更为困难。

根据获取的信息不同,多机械臂同步控制算法可分为关节空间同步控制和任务空间同步控制。关节空间同步控制应用较为广泛,现有文献相对丰富。而多机械臂工作任务是在任务空间中规划的,当存在运动学不确定性时,关节的同步运动并不能确保任务空间的同步运动,因此任务空间同步控制近来成为研究热点。

1.1 关节空间同步控制

顾名思义,关节空间同步控制是指通过设计同步控制算法,使得每个机器人相应关节的角位移和角速度达到同步运动。这种控制方法假设系统运动学方程能够精确描述系统运动关系,即系统的 Jacobian 矩阵可精确获知,当系统关节实现同步运动时,其末端执行器即可实现期望的同步运动。

文献[15]提出了一种多机械臂关节同步控制方法,这种方法能够在线估计机械臂关节的角速度,实现关节位移同步运动,但没有考虑机械臂系统的不确定性和外部干扰。文献[16]进一步研究了基于速度观测器的柔性机器人关节空间同步控制方法。文献[17-18]运用交叉耦合误差和 LQG (linear quadratic Gaussian) 优化方法,设计了一种广义同步控制算法,能够实现系统高精度操作,这种方法仅考虑了一个自由度的多运动轴系统,不适用于复杂的非线性机械臂。文献[19]运用收缩分析(contraction analysis)原理研究了机械臂关节同步控制问题,提出了一种新的设计构架。文献[20]运用无源-耗散原理,并考虑了通信时延,设计了自适应同步控制算法。文献[21]运用 Matrosove's 定理研究了平面机械臂的同步控制问题(不需要考虑机械臂的重力影响),其同步控制算法还考虑了控制器输出饱和问题。文献[22]研究了基于领导者-追随者 (leader-follower) 通信拓扑网络的多机械臂关节同步控制方法。

关节同步控制方法较好地解决了系统存在不确定性和外部干扰情况下的关节同步运动问题,未涉及存在运动学不确定性的问题。当存在运动学不确定性时,关节同步控制不能有效实现生产任务。虽然关节空间同步控制考虑了通信时延和有向拓扑通信网络的情况,但对于时变时延和通信拓扑尚未做深入研究。

1.2 任务空间同步控制

任务空间同步控制是指在机械臂任务空间中规划期望轨迹,根据机械臂末端执行器的位置和速度设计同步控制算法。高速摄像机可直接用于末端执行器位置和速度的测量,使得机械臂任务空间控制变为可能。这种方法与生产任务直接相关,因而更加直观。

文献[23]运用交叉耦合误差技术,提出了一种任务空间自适应同步控制算法。文献[24]运用 Terminal 滑模控制原理,提出了一种任务空间有限时间同步控制算法。文献[25]研究了基于低通滤波器的滑模同步控制算法,能够有效克服系统集总参数不确定性,实现渐近稳定。上述文献假定机械臂不存在运动学不确定性,即机械臂的 Jacobian 矩阵可以精确获得。在现实中,由于机械臂经常抓取不同尺寸的工件,它们的关节存在装配误差等原因,运动学不确定性难以避免^[26-27]。考虑运动学不确定性和动力学不确定性条件下的多机械臂同步控制,具有重要的现实意义,并在理论上更具挑战性。

文献[28]运用多智能体一致的原理,提出了一种自适应任务空间同步控制方法,能够克服系统运动学不确定性,该文献没有考虑系统动力学问题。文献[29]运用自适应控制原理和交叉耦合控制方法,提出了一种考虑运动学不确定性和动力学不确定性的自适应 Jacobian 任务空间同步控制方法。文献[30]根据机器人系统的无源性,设计了一种任务空间同步控制方法,能够实现动力学参数不同的多机械臂同步控制。

同时考虑运动学不确定性和动力学不确定性的任务空间同步控制算法刚刚起步,现有算法强调了系统参数不确定性的影响,但是未涉及外部干扰的影响。对于欠驱动机械臂和冗余驱动机械臂的任务空间同步控制基本未涉及,这类问题在理论研究上具有较高的难度。如果考虑时变的时延和通信拓扑,问题将更为复杂。

2 并联机器人同步控制

并联机器人是一个封闭的机构,具有较大刚性和操作精度,能够承担较大的负载,在大型制造业中具有重要地位,还可作为飞行器和潜艇的模拟训练器^[31-32]。并联机器人在运动过程中需要并联支杆协作运动才能使上平台跟踪期望轨迹。传统并联机器人控制算法仅考虑上平台的位姿跟踪,未考虑各支杆之间的协调问题,限制了系统控制性能的进一步提高。并联机器人同步控制算法能够同时强调上平台位姿跟踪和各支杆之间的协调问题,较大程度地提高了系统控制性能。

文献[33]认为,当每根支杆的实际位置与其期望轨迹之比都相等时,并联机器人即达到同步运动状态,基于此概念,提出了一种饱和比例-积分同步控制方法。文献[34]提出了一种不明确基于动力学模型的并联机器人同步控制方法。文献[35]提出了一种基于并联机器人 Jacobian 矩阵的同步误差的自适应同步控制方法。文献[36]提出了一种能够对多种性能指标进行优化的凸同步控制方法。文献[37]提出了一种完全自适应同步控制方法,在仅知并联机器人关节空间动力学模型结构的条件下,能够保证系统渐进稳定。文献[38]运用 Terminal 滑模原理,提出了一种有限时间稳定的同步控制方法,能够保证并联机器人运动关节在有限时间内达到同步运动。文献[39]研究了冗余并联机器人运动特性,提出了一种冗余并联机器人同步控制算法。

现有方法针对并联机器人运动学特点,提出了一系列同步误差概念,并设计了许多不同的控制算法。然而,并联机器人运动学关系非常复杂,现有的同步控制算法也相当复杂,如何设计一种简单高效的同步控制算法是一个有意义的研究方向。当 Jacobian 矩阵存在不确定性时,如何设计同步控制算法,也是值得进一步研究与探讨的问题。

3 移动机器人编队控制

移动机器人编队包括多车编队、飞行器编队和卫星姿态编队等。这类系统在探矿、侦查和无人战斗机中具有广泛应用^[40-41]。现有一致控制算法只能保证移动机器人实现某种期望的队形,而对于其运动过程并未加以约束。同步控制方法能够保证移动机器人在跟踪各自期望轨迹的同时实现有序的队形变换,是一种非常具有潜力的编队控制方法。

文献[42]运用交叉耦合误差原理和同步控制方法,提出了一种移动机器人编队控制方法。文献[43]运用交叉耦合误差原理和 Terminal 滑模控制方法,设计了一种有限时间稳定同步的编队控制算法。文献[44]运用收缩分析原理研究了空间飞行器的同步编队控制方法。文献[45]根据 Terminal 滑模控制原理提出了一种空间飞行器的编队控制方法。文献[46]研究了空间飞行器的有限时间稳定同步控制。

移动机器人编队控制是一个热点研究领域。同步控制方法另辟蹊径,为解决这类问题提供了一套行之有效的方案。目前运用同步控制方法解决编队问题的研究刚刚起步,发展空间很大。针对具体问题定义更加有效的同步函数和同步误差,并在此基础上设计鲁棒性强的同步控制算法,仍然需要付出许多努力。

4 多智能体一致控制

多智能体控制主要研究刚性质点的位置和速度一致问题,机械系统同步控制是多智能体一致控制的一个重要范畴^[47]。目前,多智能体一致控制是一个非常热的研究领域,引起了广泛关注,发表了大量论文。多智能体一致控制问题多针对线性对象,目前的研究热点集中于存在时变时延、时变拓扑的系统。

文献[48]研究了单积分系统在时变通信拓扑和时延下的一致控制问题。文献[49]研究了离散非线性系统在时变通信下的一致控制问题。文献[50]研究了双积分系统在速度不可测、控制输出饱和等情况下的一致控制问题。文献[51]研究了高阶线性系统在时变通信拓扑下的一致控制问题。文献[52]研究了双积分系统的有限时间一致控制问题。文献[53]提出了一种基于领导者-追随者通信拓扑的自适应滑模一致算法。

关于多智能体一致控制领域的研究方向及进展,有兴趣的读者可以参阅文献[54-58]以及其中的引文,此处不一一赘述。

多智能体一致控制发展非常迅速,新方法不断出现。虽然这些方法大都针对线性系统设计,不能直接应用于非线性的机械系统,但是这些方法与观点对于机械系统同步控制具有很好的启发作用,其研究成果为机械系统同步控制提供了丰富的理论支持,值得相关研究人员借鉴。

5 结论与展望

机械系统同步控制是一个新的研究领域,近年来取得了较大进展。不同类别机械系统的运动学和动力学性质相差甚远,因此其同步控制算法具有较大的差别。同步控制算法设计思想是针对系统运动学特点,定义相关的同步误差,依靠同步控制算法实现具体生产任务或提高系统的操作品质。从这一点上讲,同步控制又具有很大的共性。虽然同步控制取得了许多成绩,但仍然存在一些科学问题值得进一步研究与探索。

1) 机械系统的非线性特征使得存在时延和时变拓扑的同步控制算法极具挑战性,值得进一步探索。

2) 智能体一致控制取得了丰富的理论成果,结合多智能体一致控制理论研究机械系统同步控制方法,是一个潜在的研究方向。

3) 同步控制虽然在理论上取得一定发展,但是在实际应用中相对较少,其主要原因在于现有方法都非常复杂,在工程应用中受到限制,设计简单实用的同步控制算法具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Cui R, Yan W. Mutual synchronization of multiple robot manipulators with unknown dynamics[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 68(2): 105-119.
- [2] Nuno E, Ortega R, Basanez L, Hill D. Synchronization of networks of nonidentical Euler-Lagrange systems with uncertain parameters and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(4): 935-941.
- [3] Shang W, Cong S, Jiang S. Synchronization control of a parallel manipulator with redundant actuation in the task space[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, 26(4): 432-440.
- [4] Chen G, Lewis F L. Distributed adaptive tracking control for synchronization of unknown networked Lagrangian systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2011, 41(3): 805-816.
- [5] Rinaldi F, Chiesa S, Quagliotti F. Linear quadratic control for quadrotors UAVs dynamics and formation flight[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 70(1-4): 203-220.
- [6] Chen C S, Chen L Y. Cross-coupling position command shaping control in multi-axis motion systems[J]. *Mechatronics*, 2010, 21(3): 625-632.
- [7] Jiao X, Mei Z. Reduced-order observer-based robust synchronisation control of cold rolling mills with measurement delay[J]. *International Journal of Control*, 2010, 83(10): 2080-2090.
- [8] Zhang L B, You Y P, Yang X F. A control strategy with motion smoothness and machining precision for multi-axis coordinated motion CNC machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1-4): 335-348.
- [9] Jiang J G, Zhang Y D. Motion planning and synchronized control of the dental arch generator of the tooth-arrangement robot [J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2013, 9(1): 94-102.
- [10] Portillo-Velez R D, Cruz-Villar C A, Rodriguez-Angeles A. On-line master/slave robot systems synchronization with obstacle avoidance[J]. *Studies in Informatics and Control*, 2012, 21(1): 17-26.
- [11] Nijmeijer H, Rodriguez-Angeles A. *Synchronization of mechanical systems*[M]. Singapore: World Scientific, 2003: 1-13.
- [12] Ren L. *Synchronized trajectory tracking control for parallel robotic manipulators*[D]. Toronto: University of Toronto, 2006: 1-20.
- [13] Chung S J. *Nonlinear control and synchronization of multiple Lagrangian systems with application to tethered formation flight spacecraft*[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2007: 1-17.
- [14] Nair S S. *Stabilization and synchronization of networked mechanical systems*[D]. Princeton: Princeton University, 2006: 1-21.
- [15] Rodriguez-Angeles A, Nijmeijer H. Mutual synchronization of robots via estimated state feedback: A cooperative approach [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(4): 542-554.
- [16] Rodriguez-Angeles A, Nijmeijer H. Synchronizing tracking control for flexible joint robots via estimated state feedback[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, 126(1): 162-172.
- [17] Xiao Y, Zhu K, Liaw H C. Generalized synchronization control of multi-axis motion systems[J]. *Control Engineering Prac-*

- tice, 2005, 13(7): 809-819.
- [18] Xiao Y, Zhu K. Optimal synchronization control of high-precision motion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1160-1169.
- [19] Chung S J, Slotine J J E. Cooperative robot control and concurrent synchronization of Lagrangian systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(3): 686-700.
- [20] Chopra N, Spong M W, Lozano R. Synchronization of bilateral teleoperators with time delay[J]. Automatica, 2008, 44(8): 2142-2148.
- [21] Ren W. Distributed leaderless consensus algorithms for networked Euler-Lagrange systems[J]. International Journal of Control, 2009, 82(11): 2137-2149.
- [22] Mei J, Ren W, Ma G. Distributed coordinated tracking with a dynamic leader for multiple Euler-Lagrange systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(6): 1415-1421.
- [23] Sun D. Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control[J]. Automatica, 2003, 39(6): 997-1005.
- [24] Zhao D, Li S, Gao F, et al. Robust adaptive terminal sliding mode-based synchronised position control for multiple motion axes systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2009, 3(1): 136-150.
- [25] Zhao D, Li C, Zhu Q. Low-pass-filter-based position synchronization sliding mode control for multiple robotic manipulator systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(18): 1136-1148.
- [26] Liu C, Cheah C C, Slotine J J E. Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information[J]. Automatica, 2006, 42(9): 1491-1501.
- [27] Braganza D, Dixon W E, Dawson D M, et al. Tracking control for robot manipulators with kinematic and dynamic uncertainty[J]. International Journal of Robotics and Automation, 2008, 23(2): 117-126.
- [28] Cheng L, Hou Z G, Tan M, et al. Multi-agent based adaptive consensus control for multiple manipulators with kinematic uncertainties[C]//IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control. San Antonio, Texas, Sep. 3-5, 2008: 189-194.
- [29] Zhao D Y, Li S Y, Zhu Q M. Adaptive Jacobian synchronized tracking control for multiple robotic manipulators[C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, July 22-24, 2011: 3705-3710.
- [30] Liu Y C, Chopra N. Controlled synchronization of heterogeneous robotic manipulators in the task space[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(1): 268-275.
- [31] Merlet J P. Parallel robots[M]. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 1-30.
- [32] Dasgupta B, Mruthunjaya T S. The Stewart platform manipulator; A review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15-40.
- [33] Su Y, Ren L, Mills J K. Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1): 202-207.
- [34] Sun D, Ren L, Mills J K, et al. Synchronous tracking control of parallel manipulators using cross-coupling approach[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(11): 1137-1147.
- [35] Ren L, Mills J K, Sun D. Adaptive synchronized control for a planar parallel manipulator; Theory and experiments[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 128(4): 976-979.
- [36] Ren L, Mills J K, Sun D. Trajectory tracking control for a 3-DOF planar parallel manipulator using the convex synchronized control method[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 613-623.
- [37] Zhao D, Li S, Gao F. Fully adaptive feedforward feedback synchronized tracking control for Stewart Platform systems[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2008, 6(5): 689-701.
- [38] Zhao D, Li S, Gao F. Finite time position synchronised control for parallel manipulators using fast terminal sliding mode [J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(8): 829-843.
- [39] Shang W, Cong S, Zhang Y, et al. Active joint synchronization control for a 2-DOF redundantly actuated parallel manipulator[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(2): 416-423.
- [40] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control; Theory and applications[M]. London:

Springer-Verlag, 2008:1-40.

- [41] Qu Z. Cooperative control of dynamical systems: Applications to autonomous vehicles[M]. London: Springer-Verlag, 2009: 1-32.
- [42] Liu S, Sun D, Zhu C. Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(6): 1021-1031.
- [43] Zhao D, Zou T. A finite-time approach to formation control of multiple mobile robots with terminal sliding mode[J]. International Journal of Systems Science, 2012, 43(11): 1998-2014.
- [44] Chung S J, Ahsun U, Slotine J J E. Application of synchronization to formation flying spacecraft: Lagrangian approach[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(2): 512-526.
- [45] Liu H, Li J. Terminal sliding mode control for spacecraft formation flying[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 835-846.
- [46] Du H, Li S, Qian C. Finite-time attitude tracking control of spacecraft with application to attitude synchronization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(11): 2711-2717.
- [47] Sun D. Synchronization and control of multiagent systems[M]. London: Taylor & Francis, 2010: 1-28.
- [48] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [49] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2): 169-182.
- [50] Ren W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1503-1509.
- [51] Ni W, Cheng D. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(3-4): 209-217.
- [52] Li S, Du H, Li X. Finite-time consensus algorithm for multi-agent systems with double-integrator dynamics[J]. Automatica, 2011, 47(8): 1706-1712.
- [53] Zhao D, Zou T, Li S, et al. Adaptive backstepping sliding mode control for leader-follower multi-agent systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(8): 1109-1117.
- [54] Ren W, Beard R W, Atkins E M. A survey of consensus problems in multi-agent coordination[C]// American Control Conference. Portland, OR, June 8-10, 2005: 1859-1864.
- [55] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [56] Liu Y Y, Slotine J J E, Barabási A L. Controllability of complex networks[J]. Nature, 2011, 473(7346): 167-173.
- [57] Li Z, Duan Z, Chen G, Huang L. Consensus of multiagent systems and synchronization of complex networks: A unified viewpoint[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2010, 57(1): 213-224.
- [58] Ren W, Cao Y. Distributed coordination of multi-agent networks[M]. London: Springer-Verlag, 2011: 1-43.

(责任编辑: 吕文红)