

文章编号: 1000-5013(2009)06-0601-05

6 自由度绳牵引并联起重机器人的研究进展

郑亚青

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 阐述绳牵引并联机器人的优点及应用领域, 介绍基于矢量封闭原理, 按绳的根数与末端执行器自由度之间关系的绳牵引并联机器人的分类方法. 指出每类机器人都可作为起重机器人用于货物吊装, 以及在机构类型为欠约束的, 由 3 根绳牵引的 6 自由度并联起重机器人的每个支链上加上 1 个移动自由度的杆支撑机构, 从而产生新型 6 自由度机器人系统的概念. 研究该类机器人机构构型配置与吊具可控工作空间的关系, 提出简化而可行的反馈控制策略, 以实用化吊具轨迹跟踪控制方案. 拓展该新型 6 自由度机器人系统的含义, 提出含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人的概念, 并将其应用到对大型造船门式起重机的改造上.

关键词: 刚柔混合支链; 绳牵引; 并联机器人; 吊具

中图分类号: TH 213.01

文献标识码: A

1 绳牵引并联机器人的分类

绳牵引并联机器人, 是指采用绳索代替传统连杆作为驱动元件的并联机器人. 该机器人具有结构简单、惯性小、工作空间大和运动速度快等优点. 20 世纪 80 年代, 美国国家标准与技术研究院 (NIST) 研制了用于吊装的绳牵引并联机器人 RoboCrane^[1], 先后出现应用于物料搬运、工业加工、虚拟现实和体育训练等领域的样机, 并逐渐成为一个新的研究领域^[2-5].

根据矢量封闭原理, 绳牵引并联机器人一般分为以下 4 类^[6]: (1) 当 $m = n$ 时, 为不完全约束定位机构 (IRPMs). 其中, m 为绳的根数, n 为末端执行器的自由度, 下同; (2) 当 $m = 1 + n$ 时, 为完全约束定位机构 (CRPMs); (3) 当 $m > 1 + n$ 时, 为过约束定位机构 (RRPMs); (4) 当 $m < n$ 时, 为欠约束定位机构 (URPMs). 这 4 类的绳牵引并联机器人都可引入到起重技术中, 产生绳牵引并联起重机器人的概念.

由于绳牵引并联起重机器人的吊具 (即末端执行器), 一般要进行 3 个空间平动运动与 3 个空间转动运动 (即 6 自由度的运动). 因此, 仅探讨 6 自由度绳牵引并联起重机器人. 其中, 6 根绳牵引的 6 自由度的 RoboCrane 属于第 1 类. 对于此类不完全约束机构, 当末端执行器有外力作用时, 最多有 1 组绳张力的解 (奇异位姿除外).

Kino 等^[7]提出的 7 根绳牵引的 6 自由度并联机器人属于第 2 类. 对于此类完全约束机器人机构, 除奇异情况外, 绳张力的解空间为力雅可比矩阵的一维仿射子空间, 求解较为容易.

Bostelman 等^[8]、耿永锋等^[9]、郑亚青^[10]提出的 8 根绳牵引的 6 自由度的并联起重机器人属于第 3 类. 从机构学上看, 这类绳牵引并联机器人系统属于过约束定位机构. 同时, 由于绳的根数大于末端执行器的自由度数, 属于冗余驱动范畴, 在控制过程中需要实时优化分配绳的张力, 增加控制的难度. 此类绳牵引并联机器人本质上是复杂的时变、强耦合、多输入多输出非线性系统, 每个控制任务本身就是一个动力学任务.

对于过约束定位机构, 解空间变为多维仿射子空间, 张力的实时优化显得尤为必要, 其过程使控制变得复杂. 刘树青等^[11]提出的 3 根绳牵引的 6 自由度欠约束并联起重机器人属于第 4 类. 由于该类机

收稿日期: 2008-04-09

通信作者: 郑亚青 (1974), 女, 副教授, 工学博士, 主要从事绳牵引并联机构的研究. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50805054); 中国博士后科研基金资助项目 (20090450721); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (50910157).

器人机构是欠约束的, 所以实际应用时只用到其平动吊运功能. 文[11] 中将其视为 3 自由度的绳牵引并联平动起重机器人, 这种说法是不妥的.

以上 4 类 6 自由度绳牵引并联起重机器人都有其合适的应用场合, 但都有各自的缺点. 目前, 前 3 类机器人的机构学理论与运动控制技术研究得比较成熟, 有大量的理论研究成果可以参考, 也出现了大量研制成功的实验样机, 应用前景比较广阔.

2 欠约束并联起重机器人的改进

第 4 类绳牵引并联起重机器人由于机构欠约束的缺点, 其应用受到了限制. 1992 年, Arai 等^[12] 对其进行改进, 在 3 根绳牵引的并联起重机器人前面, 串联一个 3 自由度(2 个平动自由度和 1 个转动自由度)的杆支撑串联机器人, 并提出了 6 自由度起重机器人的概念. 该机器人可准静态地起吊比传统起重机能更重的吊重, 但由于该机器人是杆绳混联式的机构, 系统的刚度比较差^[11]. 德国 Rostock 大学的 Maier 等^[13-14] 也对 Arai 提出的机器人进行运动学逆解分析, 以及对运动学级的控制进行研究. 由于没发现具有明显的优点, 就放弃对其进一步研究.

1998 年, Maier 等^[15-21] 开始对第 4 类绳牵引并联起重机器人进行改进. 在该类机器人的每个支链上加上 1 个移动自由度的杆支撑机构(3 个移动杆支撑机构是互相平行的), 提出了带有串联子系统的 3 根绳牵引的 6 自由度并联起重机器人 Cable V 的概念. 机构简图如图 1 所示. 该 Cable V 系统将起重机在大工作空间范围内支撑很重负载的性能与机器人操作机的灵活性相结合, 不仅能控制负载的平动, 还能控制其姿态.

此外, 对其机构学理论与运动控制技术的研究, 也取得了一系列的理论研究成果, 并研制了一台实验样机. 其主要的理论成果是, 提出非线性的前馈控制和反晃动反馈控制相结合的吊具轨迹跟踪控制方案^[15-21]. 吊具轨迹跟踪控制方案中的非线性的前馈控制是基于平坦化的控制, 而反晃动反馈控制是属于准静态反馈控制. 即通过对实际状态量的准静态(即代数形式)反馈, 以实现对机器人系统的非线性动力学模型的完全线性化. 由二者组成的控制方案, 能使吊具实现在整个状态空间上的渐近稳定的轨迹跟踪控制.

Yamamoto 等^[22] 也对第 4 类机器人进行改进. 在该类机器人的每个支链上, 分别加上 1 个平动自由度的杆支撑机构, 提出了一种新型的 6 自由度绳牵引并联起重机器人的概念, 并建立了动力学模型. 其 3 个移动杆支撑机构的空间分布形式, 如图 2 所示. 此外, 文[22] 还提出完全反馈线性化控制策略, 并研制出一台实验样机. 以上两种机器人称为含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人(URPM 3R3T + 3 个串联子系统).

3 6 自由度并联起重机器人

含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人的理论研究, 侧重于不考虑绳的分布质量及弹性变形下的系统动力学建模, 以及吊具轨迹的精确跟踪控制技术上, 所研制的样机都在米级尺度上. 这类机器人对吊具的工作空间需求大, 对吊运轨迹要求灵活. 因此, 在牵引绳的根数不能太多及绳长不能太长的场合, 如百吨级大型造船门式起重机、轨道式集装箱门式起重机, 以及建筑工地上的门式起重机, 有

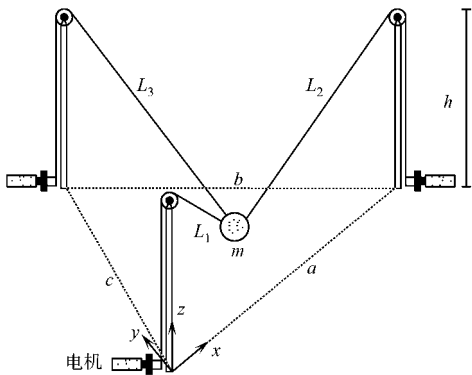


图 1 3 根绳牵引的 6 自由度欠约束并联起重机器人

Fig. 1 A 6 DOF underrestrained parallel crane robot with 3 wires

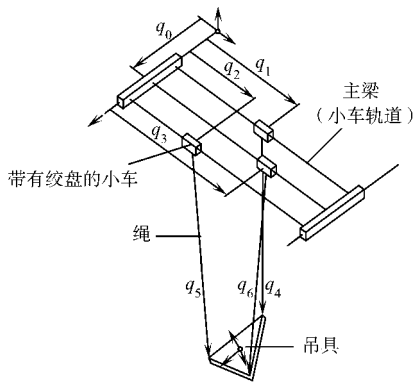


图 2 Cable V 系统的机构简图

Fig. 2 Mechanism sketch of Cable V system

相当大的应用前景^[23]. 需要说明的是, 该类机器人在实际应用中, 其尺度往往是几十米级(或百米级)的. 因此, 所采用绳的分布质量和弹性变形往往不能被忽略. 但作为原理性的研究, 且所建造的样机都是米级尺度的, 以上所涉及的研究提前是合理的.

对于何种构型的配置能使吊具具有更大的吊运工作空间(平动或转动), 尚未有这方面的研究. 文[13-21]提出的吊具轨迹跟踪控制方案, 其性能在很大程度上取决于系统动力学模型的有效性, 也就是说该控制方案的鲁棒性未得到验证. 另外, 其准静态反馈控制结构复杂, 不仅不能调整其反馈增益, 而且该非对称稳定性是在状态空间内有效的, 而不是吊具的整个工作空间有效. Yamamoto 等^[22]提出的吊具轨迹跟踪控制方案亦存在相同问题.

以上这些问题, 在很大程度上将影响到该类机器人能否得到实用化. 因此, 有必要研究该类机器人机构构型配制与吊具可控工作空间的关系, 并提出简化而可行的反馈控制结构, 以使吊具轨迹跟踪控制方案变得实用化. 基于此, 对第 4 类绳牵引并联起重机器人进行改进. 在该类机器人的每个支链上加上 1 个转动或平动自由度的杆支撑机器人机构, 提出含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人的一般含义, 并将其运用到对大型造船门式起重机的改造上, 产生了大型造船门式绳牵引并联起重机器人的概念, 如图 3 所示.

该机器人能实现 6 自由度的吊运任务, 比传统的起重机实现更高的起重能力、更灵活的吊运轨迹、更大的吊运空间及更精确的吊运轨迹. 文[23-24]对该机器人进行机构设计与运动学位置逆解分析, 以及运动学控制的研究.

对于米级该类机器人的机构学理论, 以及其吊具吊运轨迹跟踪控制技术的研究, 将侧重在以下几个方面: (1) 能使吊具具有更大吊运工作空间的机器人的机构构型配置; (2) 具有良好稳定性和强鲁棒性, 由简单反馈控制器和前馈控制器组成的吊运轨迹精确跟踪的控制方案(图 4); (3) 研制一台米级实验样机, 且在其上进行吊运轨迹跟踪控制研究. 研究成果将为研究几十米级(或百米级)的该类并联起重机器人, 以及为机器人化打下理论基础和实验基础. 同时, 也可对该实验样机进一步产业化, 使之直接用于小型的起重场合.

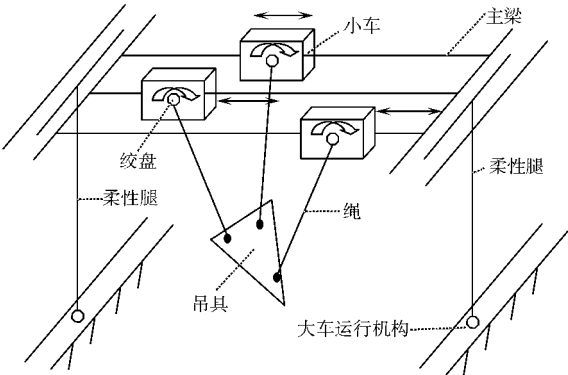


图 3 门式绳牵引并联起重机器人机构简图
Fig. 3 Mechanism sketch of wire driven parallel gantry crane robots for shipyards

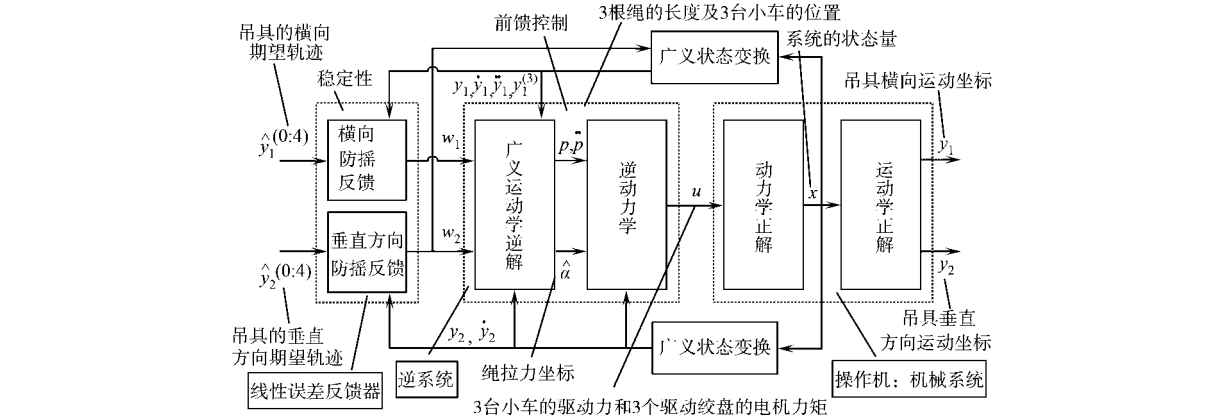


图 4 吊运轨迹跟踪控制方案

Fig. 4 Trajectory tracking control scheme of the spreader

需指出的是, 如果所提出的米级大型造船门式绳牵引并联起重机器人的实验样机研制成功, 所得出的机构学理论与控制技术的研究成果, 并不能直接应用到百米级的大型造船门式绳牵引并联起重机器人的全尺度样机的研发上. 因为所采用的绳的分布质量和弹性变形都不能忽略, 而机器人系统动力学涉及到主梁、吊具和移动小车组成多刚体动力学, 以及随时间变化的绳索系力学(简称为时变索系力学),

所以, 要对时变索系与多刚体组合系统的动力学进行求解. 可以通过采用一种特别适于微分-代数方程的位移格式积分器来解决^[25].

利用机械系统动力学仿真软件(ADAMS), 对百米尺度原型的大型造船门式绳牵引并联起重机器人进行机械设计和建模. 调用在控制系统设计软件 Matlab 下所设计的吊具吊运轨迹跟踪控制方案进行交互式仿真分析, 从而建立一套时变索系和多刚体动力学的反馈控制仿真系统, 实现了动力学与反馈控制的一体化仿真, 如图 5 所示^[26]. 它为研制百米级的全尺度原型实验样机打下理论基础, 使得含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人在大型造船门式起重机的机器人化成为事实.

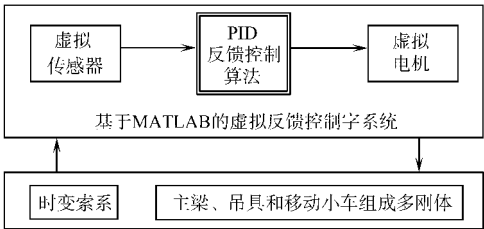


图 5 多体动力学反馈控制仿真系统
Fig. 5 Feedback control simulation system
based on multi body dynamics

4 结束语

含 3 个刚柔混合支链的 6 自由度并联起重机器人, 是绳杆混合并联起重机器人的一种, 可将其运用到对大型造船门式起重机的改造上. 米级实验样机的机构学理论和吊具轨迹跟踪控制方案比较简单, 其绳的分布质量可忽略; 而百米尺度原型的该类机器人, 其绳的分布质量及弹性变形不能忽略. 因此, 要通过建立时变索系和多刚体组合的动力学仿真系统, 以及交互式调用反馈控制仿真系统, 来实现对原型样机的设计和研究.

参考文献:

[1] ALBUS J, BOSTELMAN R, DAGALAKIS N. The NIST robocrane[J]. Journal of Robotic Systems, 1993, 10(5): 709-724.

[2] GORMAN J J, JABLOKOW K W, CANNON D J. The cable array robot: Theory and experiment[C] // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul: [s. n.], 2001: 2804-2810.

[3] NING Ke-jun, ZHAO Ming-yang, LIU Jie. A new wire-driven three degree of freedom parallel manipulator[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(3): 816-819.

[4] MA Ou, DIAO Xiu-min. Dynamics analysis of a cable driven parallel manipulator for hardware in the loop dynamic simulation[C] // Proceedings of the 2005 IEEE/ ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, California: [s. n.], 2005: 837-842.

[5] KAWAMURA S, IDA M, WADA T, et al. Development of a virtual sports machine using a wire driven system: a trial of virtual tennis[C] // Proceedings of the 1995 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, [s. n.], 1995: 111-116.

[6] MING A, HIGUCHI T. Study on multiple degree of freedom positioning mechanisms using wires (I): Concept design and control[J]. International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1994, 28(2): 131-138.

[7] KINO H, YAHIRO T, TAKEMURA F, et al. Robust pd control using adaptive compensation for completely restrained parallel wire driven robots: Translational systems using the minimum number of wires under zero gravity condition[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4): 803-812.

[8] BOSTELMAN R, ALBUS J, DAGALAKIS N, et al. RoboCrane project: An advanced concept for large scale manufacturing[C] // Proceedings of the AUVSI Conference, Orlando: [s. n.], 1996: 509-521.

[9] 耿永锋, 陈 峰. G-6 型绳牵引并联起重设备位姿空间与方位空间研究[J]. 科技资讯, 2007(20): 28-29.

[10] 郑亚青. 吊装绳牵引并联起重机器人的建模分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5): 496-501.

[11] 刘树青, 吴洪涛. 一种新型起重机器人的运动学分析与应用[J]. 河北科技大学学报, 2004, 25(2): 58-61.

[12] ARAI T, OSUMI H. Three wire suspension robot[J]. Industrial Robot, 1992(19): 17-22.

[13] MAIER T, WOERNLE C. Kinematic control of cable suspension robots[C] // Proceedings of the NATO- ASI Computational Methods in Mechanisms, Varna: [s. n.], 1997: 421-430.

[14] MAIER T, WOERNLE C. Inverse kinematics for an underconstrained cable suspension manipulator[C] // Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998: 97-104.

- [15] MAIER T, WOERNLE C. Flatness based control of underconstrained cable suspension manipulators[C] // Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference. Nevada: [s. n.], 1999: 359-369.
- [16] MAIER T, WOERNLE C. Dynamics and control of a cable suspension manipulator[C] // Braun M. Proceedings of the 9th German Japanese Seminar on Nonlinear Problems in Dynamical Systems: Theory and Applications. Duisburg: University of Duisburg, 2001.
- [17] HEYDEN T, MAIER T, WOERNLE C. Trajectory tracking control for a cable suspension manipulator[C] // Lencic J, et al. Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002: 125-134.
- [18] HEYDEN T, MAIER T, WOERNLE C. Path tracking control for a three cable manipulator[C] // Proceedings 48th International Scientific Colloquium. Ilmenau: [s. n.], 2003.
- [19] HEYDEN T, WOERNLE C. Exact state space linearization of a kinematically undetermined cable suspension manipulator[C] // Proceedings 49th International Scientific Colloquium. Ilmenau: [s. n.], 2004.
- [20] HEYDEN T, WOERNLE C. Flatness based trajectory tracking control of an under constrained cable suspension manipulator[J]. Journal of Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 4(1): 129-130.
- [21] HEYDEN T, WOERNLE C. Dynamics and flatness based undetermined cable suspension manipulator[J]. Multi-body System Dynamics, 2006(16): 155-177.
- [22] YAMAMOTO M, YANAI N, MOHRI A. Trajectory control of incompletely restrained parallel wire suspended mechanism based on inverse dynamics[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 840-850.
- [23] 郑亚青. 大型造船门式绳牵引并联起重机器人的运动学控制[J]. 机电技术, 2007, 30(S1): 224-227.
- [24] 郑亚青. 大型造船门式绳牵引并联起重机器人的机构设计与运动学位位置逆解分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 366-370.
- [25] 路英杰, 任革学. 刚体动力学方程的一个辛积分方法[J]. 应用数学与力学, 2006, 27(1): 47-52.
- [26] 路英杰. 大射电望远镜馈源支撑系统定位与指向控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.

Research Development for 6-Degree-of-Freedom Wire-Driven Parallel Crane Robots

ZHENG Ya-qing

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: At first the advantages and the applications of wire driven parallel robots have been pointed out. Thereafter, the classification of wire driven parallel robots has been given according to the vector closure principle and the relationship between the number of wires and the number of degree of freedom (DOF) of the motions of the end-effector, and it has been stated that every class of wire driven parallel robots can be used in cargo handling like a robot crane. Moreover, it has been stated that if each kinematic chain of a 6-DOF wire driven parallel robot with 3 wires, the mechanism configuration of which belongs to URPMs (underrestrained positioning mechanisms), is added a 1 translational DOF rigid mechanism, it will be a new type 6-DOF robot. The relationship between the mechanism configuration and controllable workspace of the spreader is investigated, and a simple and suitable feedback control scheme for tracking control of trajectories of the spreader is proposed. The definition of this new type of 6-DOF robots is extended and the concept of 6-DOF parallel crane robots containing 3 rigid and flexible hybrid subchains is presented, and it has been used in reforming large sized shipbuilding gantry cranes.

Keywords: rigid and flexible hybrid subchain; wire driven; parallel robot; spreader

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)