

Development of Parallel Manipulators

Jinfeng Wang, Xiaoliang Fan

Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, 071003

Email: wjf266@163.com, fxl188@263.com

Abstract: With the development of advanced manufacturing technology, parallel manipulators were developed into an important element of digital manufacturing from the simple materials -handling devices. On the basis of consulting plenty of domestic and foreign related literature, the features and applications of parallel manipulators were introduced, the main achievements and existing problems of parallel manipulators researching in recent years were summarized from three aspects of kinematics, dynamics and control strategy.

Keywords: Parallel manipulators; Kinematics; Dynamics; Control strategy

并联机器人发展研究

王进峰, 范孝良

华北电力大学机械工程系, 保定, 中国, 071003

Email: wjf266@163.com, fxl188@263.com

摘要: 随着先进制造技术的发展, 并联机器人已从简单的上下料装置发展成数字化制造中的重要单元。在查阅了大量国内外相关文献的基础上, 介绍了并联机器人的特点、应用, 从运动学、动力学、控制策略三方面总结了近年来并联机器人的主要研究成果, 并指出面临的问题。

关键词: 并联机器人; 运动学; 动力学; 控制策略

1 引言

1895年, 数学家 Cauchy 研究一种“用关节连接的八面体”, 开始人类历史上并联机器人的研究。1938年 Pollard 提出采用并联机构来给汽车喷漆。1949年 Caough 提出用一种并联机构的机器检测轮胎, 这是真正得到运用的并联机构。而并联结构的提出和应用研究则开始于 70 年代。1965年, 德国人 Stewart 发明了六自由度并联机构, 并作为飞行模拟器用于训练飞行员。1978年澳大利亚人 Hunttichu 把六自由度的 Stewart 平台机构作为机器人机构, 自此, 并联机器人技术得到了广泛推广。

2 并联机器人的特点

自工业机器人问世以来, 采用串联机构的机器人占主导地位。串联机器人具有结构简单、操作空间大, 因而获得广泛应用。由于串联机器人自身的限制, 研究人员逐渐把研究方向转向并联机器人。和串联机器人相比, 并联机器人有以下特点:

(1) 并联结构其末端件上同时由 6 根杆支撑, 与

串联的悬臂梁相比刚度大, 结构稳定。

- (2) 由于刚度大, 并联结构较串联结构在相同的自重或体积下, 具有更大的承载能力。
- (3) 串联机构末端件上的误差是各个关节误差的积累和放大, 因而误差大、精度低, 并联式则没有那样的误差积累和放大关系, 微动精度高。
- (4) 串联机器人的驱动电机及传动系统大都放在运动着的大小臂上, 增加了系统的惯量, 恶化了动力性能, 而并联机器人将电机置于机座上, 减小了运动负荷。
- (5) 在位置求解上, 串联机构正解容易, 但逆解困难。而并联机构正解困难, 逆解非常容易。

3 并联机器人的应用

并联机构的出现, 扩大了机器人的应用范围。随着并联机器人研究的不断深入, 其应用领域也越来越广阔。并联机器人的应用大体分为六大类。运动模拟器、并联机床、工业机器人、微动机构、医用机器人和操作器。

- (1) 运动模拟器。训练用飞行模拟器具有节能、经济、安全、不受场地和气象条件限制、训练周期短、训练效率高等突出优点。通过模拟器可以在早期发现问题、减少风险、进行综合系统验证,解决各系统间的动态匹配关系、加速系统实验过程,缩短研制周期,降低开发费用。
- (2) 并联机床。用作并联机床是并联机构最具吸引力的应用。并联机床结构简单,传动链短,刚度大、质量轻、成本低,容易实现“6轴联动”,能加工更加复杂的三维曲面。还具有环境适应性强的特点,便于重组和模块化设计,可构成形式多样的布局和自由度组合。
- (3) 工业机器人。随着工业现代化发展的高速进程,以及加工业工艺的不断改善,技术的不断进步,工业机器人的应用被越来越多的企业认识和接受。工业机器人既保证了产品质量,又减少了特殊环境工作的危险和实现对人劳动强度的降低和人员劳动保护意识的提高。
- (4) 微动机构。微动机构是并联机器人的重要应用。微动机构发挥了并联机构的特点,工作空间不大,但精度和分辨率非常高。
- (5) 医用机器人。医疗机器人已经成为医学外科学会和机器人学会共同关注的新技术领域。医疗机器人具有选位准确、动作精细、避免病人传染等特点。
- (6) 操作器。并联机器人可以用作飞船和空间对接器的对接机构,上下平台中间都有通孔作为对接后的通道,上下平台作为对接环,由6个直线驱动器以帮助飞船对正,对接机构还能完成吸收能量和减振,以及主动抓取、对正拉紧、柔性结合、最后锁住卡紧等工作。

4 并联机器人的主要研究方向

由于并联机器人能够解决串联机器人应用中存在的问题,因而,并联机器人扩大了整个机器人的应用领域。由并联机器人研究发展起来的空多自由度多环并联机构学理论,对机器人协调、多指多关节灵活手爪等构成的并联多环机构学问题,都具有十分重要的指导意义。因此,并联机构已经成为机构学研究领域的热点之一。目前,国内外关于并联机器人的研究主要集中于运动学、动力学和控制策略三大方向。

4.1 运动学分析

运动学研究内容包括位置正解、逆解和速度、加速度分析两部分内容,这是实现并联机器人控制和应用研究的基础。位置正解就是给定6杆的位移,确定平台的位置和姿态。若已知平台的位置和姿态,求解6杆的位移称为运动学逆解。并联机构的逆解较为容易而正解相对难度,这一点与串联机构相反。对于正解,机构学研究者一开始从数值解法和解析解法两个方向展开大量的研究,并取得了一系列的进展。

4.1.1 数值解法

数值解法数学模型简单,可以求解任何并联机构,但是不能求得机构的所有位置解。学者们使用了多种降维搜索算法,来获得位置正解。他们通过几何和算法的手段,把问题简化成为3个方程组的求解,通过3维搜索得到了全部的实数解。Innocenti和Parenti-Castelli提出了找到所有实数解的一维搜索算法。这一算法是通过一条假想的可变长度的连杆临时取代普通6-6平台机构的一条连杆把它变成5-5平台机构。Dagupta和Mruthunjaya提出了预测~校正算法,这一方法使用一有效的3维搜索法从纯几何角度考虑捕捉实数解。数值算法中牛顿-辛普森法是一类计算效率较高的算法。以上所有的数值方法仅在寻找实数解是有用的(对应于实际的结构),不能用于预测所有解的个数。为了获得所有的解必须在复数域内确定方程的解,Raghavan提出了实现这一目标的最成功的数值解法,他以多边形系统形式给出了公式表达式,通过Morgan的方法来求解。在复数域内找到了40个解。90年代,国内学者们也进行了大量的研究。燕山大学的黄真等对6-SPS机构通过部分输入转换的方法,将该机构的位置正解问题由六维降为三维,经巧妙的数学处理,直接得出了速度、加速度反解表达式,从而简化了机构的运动分析。华中理工的李维嘉采用虚拟连杆,将难于求正解、甚至无法求正解的机构简化成与之相近的、易于求正解的6-3结构形式,把得出的6-3型的正解,作为求这类机构正解的初始值,通过极少次迭代,得出了其正解的全部精确值。

4.1.2 解析解法

解析解法主要是通过消元法消去机构方程中的未知数,从而使得机构的输入输出方程为仅含有一个未知数的高次方程。解析解法也有许多种,包括矢量代数法、几何法、矩阵法、对偶矩阵法、螺旋代数法、

四元素代数法等。其特点为不需初值,可求得全部解,能避免奇异问题,输入输出的误差效应也可定量表示,但数学推导复杂。国内外学者求解正解的解析解,都是采用从特殊构型到一般构型的思路进行的。大致有三种方法。

- (1) 基于球面 4 杆机构输入输出方程进行的。先求解 3-3 型并联机构位置正解,后来又拓展到复杂的情况,如 6-3, 4-4, 4-5 等。
- (2) 先去掉上平台,然后确定支杆与上平台结合点的轨迹,利用上平台的形状作为约束条件,推出正解方程并进一步化简。
- (3) 将整个结构的一个分支转化为等价的串联机构,再加上其余分支对其关节角度的约束获得方程。

应用这些方法,求出了从最简单的 3-3 到复杂一些的 5-5、6-4 等机构位置正解的解析解。一些学者研究发现,当上平台或下平台各自的铰链点具有共线性以及上下平台铰链点构成的多边形具有部分相似性时,正解求解会相对容易些,并给出了相应的正解解析解。Faugere 和 Lazard 在前人分析研究的基础上,根据最大可能解的数目把 Stewart 平台机构分为了 35 种结构类型。

4.1.3 速度和加速度分析

速度和加速度分析,最早是在 Fieber 和 Merlet 的文献中见到。他们研究发现 Stewart 平台机构力的正变换是直接的线性映射关系,可以用 6×6 矩阵 H 表示。其实就是传统意义的雅可比矩阵。Fieber 通过 H 的线性变换,导出了逆速度运动学公式;通过 H 的转置获得了正向运动速度运动学。加速度运动学也可以类似的处理得到。由于速度运动学能直接用于微分运动,Ropponen 和 Arai 已经将它用于关节的精度分析。燕山大学黄真教授利用影响系数法对并联机构的加速度进行了分析。机构的一阶影响系数就是传统意义的雅可比矩阵。影响系数法能够以简单的显式表达式表示机构的速度、加速度、误差和受力等;另外还可以从分析影响系数矩阵入手,深入分析机构的一些性能,如奇异性、驱动空间与工作空间的映射、灵活性、各向同性及可操作度等。而影响系数矩阵本身计算比简单,因此影响系数法是一种较好的机构分析方法。

4.2 动力学分析

动力学的研究对象是建立描述机器人操作手动力学行为的数学模型,研究内容包括:惯性力计算、受力分析、驱动力矩分析、主负约束反力分析、动力学模型建立、计算机动态仿真、动态参数辨识等。动力学分析包括正逆两类问题。动力学的正问题是指已知操作机各主动关节提供的广义驱动力矩随时间或随位形的变化规律,求解任务空间的运动轨迹以及轨迹上各点的速度和加速度。其逆问题是指已知通过轨迹规划给出的任务空间的运动路径以及各点的速度和加速度,求解驱动器必须提供给主动关节随时间或随位形变化的广义驱动力矩。由于并联机构的复杂性,所以其动力学模型通常是一个多自由度、多变量、高度非线性、多参数耦合的复杂系统。建立动力学模型的常用方法有:Newton-Euler 法、Lagrange 法、虚功原理(virtual work principle)法、Kane 法、高斯(Gauss)法和影响系数(Influence coefficient)法等。

Newton-Euler 法的特点是:概念清晰,方法直观易懂,计算速度快,容易求解运动副反力,但推导过程复杂,方程数目庞大。

Lagrange 法以系统的动能和势能为基础的,不用分析机构的真实运动,推导过程较简便,能得到形式简洁的动力学方程,能清楚地表示出各构件的耦合特性,形式简单。此法既能用于系统的动力学分析,又能用于动力学控制。缺点是不能直接求出运动副的约束反力,求解需要大量运算。虚功原理法既可建立不含运动副约束力的纯微分型的系统动力学方程,又可建立含运动副约束反力的代数与微分混合型系统动力学方程。

Kane 方法在形式上相对简洁许多,但它是利用广义主动力和广义惯性力来建立系统的动力学方程计算过程抽象。

影响系数法分析加速度时不需求导,影响系数可以事先求出,能方便简洁地表示构件间的影射,可转化其它数学形式,能够呈现显示解。目前主要应用于刚性并联机器人的机构分析。

4.3 控制策略分析

由于并联机器人系统的复杂性,其控制策略、控制方法的研究非常困难。最初设计控制系统时。常常把并联机器人的各个分支当作完全独立的系统,使用一些常规控制方法进行控制,在实际中难以实现或得不到令人满意的控制效果。最近几年,国内外学者对并联机器人控制策略的研究才有了一定进展。

Koditschek 将 6-DOF 并联机器人系统分为机械和电机两个子系统。分别建立了两个子系统的模型和设计了控制器,从而得到整个系统的控制器,并证明了闭环控制系统的指数稳定性。我国科研人员也对并联机器人的控制理论与策略方法进行了大量研究。孔令富等基于 6-DOF 液压并联机器人的液压主动关节控制模型,通过分析机器人动力学方程,提出一种简单有效的力补偿控制方法。接着,又对并联机器人力控制算法基于并行结构的计算进行了研究,设计了并行处理双机系统结构,提高了算法处理速度,保证了实时力控制。万亚民等针对液压并联机器人运动过程中的参数时变和耦合力扰动问题,通过在前馈型网络中增加反馈环节的方法,设计了一种新型动态神经网络,同时根据能全面衡量系统性能的综合目标函数,推导出了网络控制学习算法。何景峰等针对六自由度 Stewart 型并联机器人,利用反馈线性化和 PD 控制实现了平移运动间的解耦,又通过设计一种解耦控制器完成了旋转输出解耦,从而实现六自由度并联机器人输出间的完全解耦。马骁等导出了 2-DOF 并联机械手的位置、速度和加速度逆解模型,并根据动能定理计算了机械手的质量惯性矩阵,实现了控制算法解耦,利用虚功原理建立了能用于实时控制的动力学简化模型,并设计了适合于并联机械手的计算力矩控制器。

近年来,并联机器人的控制精度和实时性能等控制问题是并联机器人研究的重点,而智能控制则是并联机器人控制的高级阶段,它指的是将模糊控制、神经网络控制等智能算法引入到并联机器人的控制中。

5 并联机器人研究面临的问题

并联机器人具有很多传统串联机器人不具备的优点,并联机器人还有很多理论问题需要进一步的研究和完善,适用于不同工作要求的新型的并联机构有待于进一步开发。目前,并联机器人研究所要解决的问题应包含以下内容:

- (1) 不同自由度的新型并联机构的研究。研究新型的并联机构,并研究相应的运动学、动力学等理论,必将会进一步丰富并联机构领域的研究成果,并进一步扩大并联机构的应用范围。

- (2) 并联机器人运动学正解数值算法的研究。主要是提高位置正解的计算速度,这项工作为并联机器人轨迹规划的基础。
- (3) 并联机器人动力学模型研究。建立通用的适用于控制系统设计的并联机器人动力学数学模型,这项工作是为开发出具有优良动力学性能的并联机构,对不同类型并联机构进行动力学分析的基础。
- (4) 并联机器人工作空间研究。研究各种奇异性对工作空间的影响,可以提高我们对并联机构运动机理的认识,是进行并联机构无奇异路径规划和实现运动的可控性的基础。
- (5) 并联机器人误差分析。建立实用的、完整的并联机构误差数学模型,分析并联机构输入误差因子对动平台位姿误差的影响,从而提高并联机器人的精度。

References (参考文献)

- [1] Innocenti, Parenti-Castelli. Singularity-free evolution from one configuration to another in serial and fully-parallel manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 1998, 120(1):73-79
- [2] Li Weijia. A Study on the Direct Kinematic Solution of Stewart Platforms. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1997, 25(9):38-40(Ch).
李维嘉. 六自由度并联运动机构正向解的研究. 华中理工大学学报, 1997, 25(9):38-40.
- [3] Cao Yi, Huang Zhen, Ding Huaifeng, Zhou Hui. Orientation-Singularity and Nonsingular Orientation-Workspace Analysis of the 6/6-Stewart Manipulator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8):50-54(Ch)
曹毅, 黄真, 丁华峰, 周辉. 6/6 型 Stewart 机构姿态奇异及非奇异姿态工作空间分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8):50-54
- [4] Koditschek, Daniel. Task encoding: Toward a scientific paradigm for robot planning and control, 1991, 9(1):5-39
- [5] Wan Yamin, Wang Sun'an, Du Haifeng. Dynamic Neural Network Control of Hydraulic Parallel Robot[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(9):955-958 (Ch).
万亚民, 王孙安, 杜海峰. 液压并联机器人的动态神经网络控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 955-958
- [6] HE Jing-feng, XIE Wen-jian, HAN Jun-wei. Output Decoupling control of 6- DOF Parallelmanipulator[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(3) :395-398 (Ch).
何景峰, 谢文建, 韩俊伟. 六自由度并联机器人输出解耦控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(3): 395-398.
- [7] KONG Ling-fu, ZHANG Shi-hui, XIAO Wen-hui, LI Cheng-yuan, HUANG Zhen. Rigid Body Dynamics Model of the 6-PUS Parallel Mechanism Based on Newton-Euler Method[J]. *ROBOT*, 2004, 26(5) :395-399(Ch).
孔令富, 张世辉, 肖文辉, 李成元, 黄真. 基于牛顿-欧拉方法的 6-PUS 并联机构刚体动力学模型[J]. 机器人, 2004, 26(5): 395-399