

基于多种构型并联机器人的奇异姿态研究发展

马榜章 赵贵琛 王权

(哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院 山东 威海 264209)

摘要: 随着并联机构技术的发展, 各种各样的并联机器人在工业生产和医疗设备中被大范围使用, 但其工作空间、奇异位形等运动性能问题亟需进一步的解决。针对这一问题, 对现今国内外建立运动学的数学模型方法、并联机器人的雅克比矩阵求解方法、并联机器人的工作空间描绘方法进行了分析, 举出了一些具有代表性的研究, 为目前种类繁多的并联机器人提供了一个统一的运动学分析思路, 并指出了目前还未解决的问题以及未来的研究方向。

关键词: 并联机器人; 奇异位形; 工作空间; 雅克比矩阵; 运动学分析

1 并联机器人研究与特点

从第一台机器人诞生起, 经过近一个世纪的发展, 机器人已经被广泛用于工业、医疗等产业。在小空间高精度的医疗领域, 相较于传统机械臂, 并联机器人因其构型多样、可操作性强引起了人们的极大兴趣。1965 年, STEWART 对 GOUGH 发明的并联机器人结构进行改进, 研制了用于飞行训练的飞行模拟器, 成为后续研究与应用最为广泛的构型。与传统的串联机器人相比: 运动链更短, 便于集成驱动装置; 并连结构刚度更高, 载荷比重更大; 没有误差累积, 可以在小空间内实现超高精度。

目前国内外的研究普遍在于新式的针对工作空间和奇异位形的运动学分析方法, 包括模型的改进, 参数的变换, 求解雅克比矩阵的方法。国内对于少自由度并联机器人(自由度 ≤ 3) 的研究已经相对全面, 而对于多自由度的并联机器人因其复杂的耦合关系, 还没有一种确定和恰当的工作空间描绘方法。

2 并联机构奇异位形研究

奇异位形指机构在特定位置下的一种速度突变情况, 包括边界奇异(工作空间干涉)和内部奇异(关节速度无限大)。在奇异位置时失去自由度, 灵活性下降, 难以到达既定位置, 甚至产生震荡和关节损坏, 末端工具更无法实现既定任务。从数学模型中可知, 在雅可比矩阵不满秩时出现奇异。目前典型的研究方法有代数法、几何法和现代理论法等。

2.1 代数法

代数法指令数学模型中的雅克比矩阵等于零进行代数求解, 经过迭代找到一系列奇异点, 最终连成奇异轨迹。但机器人的位置和姿态有较强的耦合关系, 如何解耦求解雅克比矩阵成为研究热点。据所查文献, FICHTER 等率先对 6-3 Stewart 并联机构的雅克比行列式进行了求解, 得到了一种绕垂直中心旋转 90 度的奇异位形, GOSSELIN 等根据雅克比矩阵的解耦关系将奇异类型分为: 边界奇异、位形奇异、结构奇异。这些研究为当代奇异位形研究奠定了基础, 后续的研究大多围绕 3-3 或 6-6 的 SPS、SRS 等变种进行。Huang 等对 3-6 及 6-6 Stewart 并联机构的奇异轨迹特征多项式进行了推导。郭等首次在复数域内以 watt 为模型建立分

析方程, 讨论了构型 - 分叉性 - 机构参数之间的关系。金等提出将阻尼最小方差法运用于判断奇异情况。周等运用微分法确定边界奇异情况, 运用数值分析法确定位形奇异情况, 通过将各个支链、驱动、转角副限制解析化, 通过点云图绘制出工作空间。李等单独对 6-6 构型推导并描绘了位于给定姿态的奇异轨迹和运动学特性, 分类阐述了在不同参数下奇异轨迹的情况。

2.2 几何法

几何法指通过空间变换, 在没有繁复计算的基础上通过更直观的方式寻找奇异位形, 但这种方法往往会产生遗漏。Merlet 等首次提出基于线性几何原理的奇异位形研究, 并找到了除代数法解之外的新奇异位形。马等发现复杂的位置奇异轨迹可转换到 Z 截面上, 并有明显的几何特征。通过研究姿态空间的奇异轨迹, 发现了三种特殊的姿态截面。

2.3 现代理论法

现代理论法一方面指将现代经典数学理论如李群理论, 螺旋理论、黎曼几何等引入奇异位姿的研究中, 另一方面指将人工智能引入雅克比行列式的求解中。Bonev 等利用螺旋理论得出了三自由度并联机构的所有构型, 并指出两种奇异位形。沈等将拓扑学用于揭示位形空间的拓扑几何性质, 并在此基础上提出了一种奇异位形的判别方法。

3 并联机构工作空间研究

工作空间指机构末端执行器可以到达的所有最远点平滑连接而形成的区域, 工作空间的确定是轨迹规划的重要前提。目前国际上通用的研究基础是 Kumar 等提出的可达工作空间与灵活工作空间这两大概念, 在分析过程中最常用的方法是几何法、点云法和现代数学法。

3.1 几何法

几何法的通常解法是将假想将子链拆分, 工作空间就可以仿真为若干子链的轨迹交集。对于少自由度的并联机构, 工作空间变量不多于三个, 因此可以在三维坐标系中直接绘制工作空间。白等采用优化的极限边界搜索法, 对一种三平动自由度的并联机构直接建立了工作空间, 并求出了工作空间面积、速度与加速度约束等参数。礼对一种绳牵引的六自由度并联机构利用刚度限制和拉力限制循环求解, 得到

末端可达点的集合,平滑连接即为工作空间。冯等提出一种工作空间灵敏度因子,表征了不同参数对工作空间的影响大小,根据影响最小原理限制一部分参数,实现了在三维空间内的工作空间重建。Gosselin 等在几何法的基础上进行发展,拓展出了一种将工作空间求解问题转化为轨迹面相交问题的思路。

3.2 点离散法

点离散法利用有限元的思路,将工作空间离散为点,之后结合机器人各关节约束条件描绘出工作空间的边界,再平滑连接成边界曲面。在求解最远可达点时,运动学正解法因其方程耦合度高,非线性求解困难等特性而较少被使用,运动学逆解法在固定的末端位姿上进行求解,在牺牲一部分特性解的前提下大幅提高求解效率,因此该方法使用较多。Fichter 为该方法提供了一种泛用思路,即先固定 6 个位姿参数中的 4 个,让其他 2 个参数变化,就可以得到一个固定姿态的工作空间面,更改固定的参数后迭代,就获得了全部的边界面。Masory 等采用数值积分的方法,根据关节转角、杆长等约束,比较贴近实际地对工作空间进行了求解。

$$D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \& D_i' \geq D' \quad \theta = \arccos \frac{lRn}{|l|} \leq \theta_{\max} \quad V = \frac{1}{2} \Sigma \rho^2 \Delta \gamma \Delta Z$$

其中: l 为连杆向量; θ 为平台各副转角; R 为运动副姿态; n 为各副在定坐标系中的姿态; D 为杆直径; D_i 为两杆中心连线最短距离; ρ 为极径; Δr 为增量角; Δz 为轴向增量。

曹等针对一种特定的 6-RSS 构型给出了机构约束条件的数学形式,基于运动学逆解给出了工作空间的边界曲面,并进一步优化扩大了工作空间。杨等在绘制出散点图的基础上,通过对比数值解和仿真解分析曲线,证明了所制机器人驱动分支整体运行平稳且理论正确。叶等对传统的点离散法进行改进,提出一种更高精度,无漏判点的区间离散法,并证明了该方法从计算姿态、效率、误差等方面均优于前者。

3.3 现代数学法

现代数学法综合考虑了几何法和点离散法的优劣势,并在此基础上将现代数学理论和机器学习用于其中,开拓全新的求解方法。Alp 等率先将神经网络用于计算一种 6-3 Stewart 机构的工作空间中,大幅提高求解速度并取得了较好的正确率。后续 Kuzeci 等进一步将先进的神经网络方法,如遗传算法,引入求解工作空间的任任务中,进一步提高了计算效率。Farzaneh 等对现代数学法求解方法提供了一种评估方式,并开始对机器人无碰撞空间进行研究。其引入了一种区间分析方法,这种方法评估可靠性高,但人工求解困难,在机器学习的辅助下,实现了高速准确求解工作空间。

4 奇异位形和工作空间求解方法的特性对比

在奇异位形研究方面,代数法计算过程复杂,无法直

观体现奇异性本身的物理状态,但是其泛用性较好,能通过数学的方法把握奇异轨迹在空间中的变化;几何法操作简单,实用性好,但这种方法所求解为离散点,只能在小范围的轨迹上保持精度,所以大部分学者将其用于是否产生奇异性的判断中;现代理论法在拓扑学的引入下,表明了奇异位形与参考系无关的特性,但其一是高等数学方法晦涩难懂,二是求解不充分,不能揭示全部的奇异位形。

在工作空间研究方面,几何法有较高精度和泛用性,但是操作较为复杂,图形抽象容易产生错解;点离散法程序化较好且泛用性高,但随着求解精度要求增加,点密度增大,迭代求解需要大量时间;现代数学法虽然还在探索之中,但其引入先进的神经网络,大幅提高求解效率,因此一经提出就收到学者们的青睐。

5 结语

随着并联机构技术的发展,各种各样的并联机器人在工业生产和医疗设备中被大范围使用,其运动性能的要求逐渐提高。运动学,包括工作空间和奇异位形的研究,是影响并联机器人运动性能的主要因素。纵观奇异位形的研究方法,直到目前还没有一种通用而简便的方法,此类研究仍处于瓶颈阶段。在并联机器人被广泛运用的前提下,各种构型层出不穷,这更对统一化求解带来了困难。本文对现今国内外建立运动学的数学模型方法、并联机器人的雅克比矩阵求解方法、并联机器人的工作空间描绘方法进行了分析,举出了一些具有代表性的研究。从这些研究来看,这两个领域内都存在研究矛盾,如精度与效率的矛盾、数学方式与图形方式的矛盾,这说明我们在研究方法上还未成熟。在中国制造 2025 发展目标下,未来的研究方向在于研究一种更快速简便的雅克比矩阵求解方法,以及运用人工智能的迭代方法求解末端位姿以获得完整的末端轨迹点云图。随着理论和方法的不断完善,并联机器人将在中国现代化建设中大放异彩。

参考文献:

- [1] 黄昔光,何广平,谭晓兰,袁俊杰,崔桂芝. 并联机器人机构研究现状分析[J]. 北方工业大学学报,2009,21(03):25-31.
- [2] 冯志友,李永刚,张策,杨廷力. 并联机器人机构运动与动力分析研究现状及展望[J]. 中国机械工程,2006(09):979-984.
- [3] 杨斌久,蔡光起,罗继曼,朱春霞. 少自由度并联机器人的研究现状[J]. 机床与液压,2006(05):202-205.
- [4] 叶鹏达,尤晶晶,仇鑫,王林康,李成刚,茹煜. 并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(03):363-377.
- [5] 李保坤,曹毅,张秋菊,黄真. Stewart 并联机构位置奇异研究[J]. 机械工程学,2012,48(09):33-42.