



多自由度并联机器人控制技术研究进展

罗小青

(江西省机械科学研究所 机电研究室 江西 南昌 330095)

摘要 为提高多自由度并联机器人的控制精确度和稳定性 基于动力学与冗余驱动分支等技术的控制优化方法逐渐受到学术界的广泛关注及研究。近年来 随着动力学和驱动分支模型的数学表述逐渐清晰并细化 具有多自由度的并联机器人控制精确度与稳定性也得到了进一步提高。文中通过回顾并联机器人控制技术的研究历程 梳理了现阶段相关技术的研究思路及现状 且在此基础上深入挖掘该技术中存在的问题 提出了并联机器人控制技术的未来研究趋势及发展方向。

关键词 并联机器人; 自由度; 控制技术; 动力学方程; 驱动力矩; 稳定性; 动态特性; 控制难度

中图分类号 TP24 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2023)11-089-06

doi: 10.16180/j.cnki.issn1007-7820.2023.11.013

Research Progress on Control Technology of Multi-Degree of Freedom Parallel Robot

LUO Xiaoqing

(Electromechanical Research Office, Jiangxi Institute of Mechanical Science, Nanchang 330095, China)

Abstract In order to further improve the control accuracy and stability of the multi degree of freedom parallel robot, the control optimization methods based on technical models such as dynamics and redundant drive branches have gradually attracted extensive attention and research in the academic community, and a certain number of research results and conclusions have been proposed. In recent years, with the mathematical expression of dynamics and driving branch model becoming clear and refined, the control accuracy and stability of parallel robots with multi-degree of freedom have been further improved. By reviewing the research history of parallel robot control technology, the current research ideas and status quo of parallel robot control technology are summarized. On this basis, the existing problems of parallel robot control technology are deeply explored, and the research trend and development direction of future parallel robot control technology are proposed.

Keywords parallel robot; freedom; control technology; dynamic equation; driving torque; stability; dynamic characteristics; control difficulty

随着控制理论和工业技术的快速发展,具有多自由度的并联机器人(Parallel Mechanism, PM)受到了广泛关注及研究,并被应用到日常生活与工业生产中。从机械结构角度看,机器人主要分为串联机器人和并联机器人。前者是一种由转动关节与移动关节串联形成的开式运动链机器人,其各关节间的相对运动使用驱动器进行驱动。与传统的串联机器人相比,并联机器人可以改变不同类型关节的结构,从而大幅提高机器人的生产效率。同时,由于其具有更小误差、更高精度、更大刚度、更强承载能力以及更低位置求解难度

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2207505)。

Science and Technology Research Project of Jiangxi Provincial Department of Education (GJJ2207505)

作者简介: 罗小青(1983-)男,教授。研究方向: 计算机控制与嵌入式系统。

等优点,逐渐成为学术界与工业界的主要研究对象。

文献[1]首次提出了一种具有六自由度(6-Degree of Freedom, 6-DOF)的并联式空间机构,也称为Stewart机构,并将其应用于飞行模拟器的标准机构。为了提高装配生产线的生产效率,文献[2]在机器人结构中引入了具有六自由度的Stewart平台机构,首次成功提出并联机器人的基本理念与配置方法,具有较高的原创意义。文献[3]首次对基于Stewart平台机构的并联机器人理念进行具体实践,拉开了并联机器人的研究序幕。通过回顾并联机器人控制技术的历史和发展进程,本文深入研究了该技术的基本现状,并探讨了当前相关技术优化所面临的限制,且对机器人的未来发展趋势做出了展望。

1 并联机器人

随着工业技术的不断迭代与深入,并联机器人从

结构和外型上均获得了充分研究及应用。按照不同结构类型,并联机器人的发展历程主要可分为以下几个方面:

1) 根据自由度的数量,并联机器人可分为冗余并联机器人、6-DOF 并联机器人和欠秩并联机器人。其中,冗余并联机器人的自由度均大于 6,该项研究属于前瞻性探索研究,成果较少,但未来可能产生较大影响。6-DOF 并联机器人的自由度等于 6,其是当前研究与应用较广泛的机器人,吸引了大量学者的关注及研究。欠秩并联机器人的自由度均小于 6,该类机器人的研究及应用已逐渐趋于成熟,且处于进一步验证和应用推广阶段,已经较大幅度提高了工业生产效率与产品质量。

2) 根据支柱长度是否可变,将并联机器人分为两种,即采用确定长度支柱与采用不确定长度支柱的并联机器人。前者被称为 Hexaglide,其基本平台由 6 根长度确定的支柱进行连接,同时支柱与平台以及支柱与基座间均使用铰链连接,支柱与基座间的铰链可以按照基座滑道进行移动。后者被称为 Hexapod,其平台和支柱、基座和支柱间也均使用铰链来连接,而平台与基座间的连接支柱长度不确定,通过调节支柱的长度能够深度改变机器人平台的位置以及姿势。

3) 根据机构输入形式,并联机器人可分为线性驱动以及旋转驱动并联机器人。其中,线性驱动并联机器人具有简易且唯一的位置解算方法,且已经在部分工厂中进行简单应用,该机器人的确定性较强,借鉴价值与实际意义也较高,但其功能相对简单,扩展性不佳,因此并不符合并联机器人的未来发展需求。与线性驱动并联机器人不同,旋转驱动并联机器人使用伺服或步进电机,具备更紧凑的结构及更小的惯量,其位置解更复杂且多样,这些特点也决定了该并联机器人更符合并联机器人的未来发展需求与研究趋势。

随着人工智能专业的飞速普及和发展,并联机器人的控制技术也亟需进一步优化和推广。本文分别从运动学分析以及误差分析等角度,对并联机器人的控制技术进行了深入研究与分析。

2 运动学分析

在并联机器人结构运算中,根据多个支杆长度、转角和速度来计算基本平台位置、姿态与速度,通常被称为正向运动学问题或正解问题。根据基本平台位置、姿态和速度,计算支杆长度、转角及速度,则被称为逆向运动学问题或反解问题。正解和反解等运动学解算问题是并联机器人的核心问题,研究人员曾经做出标志性的研究成果和结论,进而不断优化机器人的控制

精度和稳定性能。文献[4]在瞬时运动学中引入螺旋理论(Screw Theory),将末端执行器的瞬时运动直接表示为输入致动关节的扭转,同时证明末端执行器的扭转等于部分扭转的总和,为并联型结构的特殊配置提供了适当基础。文献[5]利用牛顿-欧拉运动方程提出了解决运动学反解问题的新型并行算法,并考虑该算法在计算设备上的实现情况。文献[6]对并联机器人的螺旋理论进行了深度思考及分析,进一步优化了运动学反解问题的求解速度。文献[7]通过改进并联机器人的反解算法流程,显著降低了运动学求解算法的复杂度,同时减小了算法的计算误差。文献[8]在CORDIC 的基础上提出了一种新型流水线结构(Pipeline Architecture),从而分解齐次链路变换矩阵(Homogeneous Transformation Matrix,HTM),在完成求解并联机器人的正解问题的同时该方法降低了正解问题的计算时间,具有一定的实际意义。文献[9]利用弹性静力学(Elasto-Static Mechanics)对并联机器人的机械手部件进行了更精确的弹性静态标定,进一步提高了机器人的控制精度。文献[10]基于闭式解提出了适用于并联机器人反解问题的求解方法,实现了流水线解和并行解之间的严格区分,有效降低了求解反解问题的计算复杂性,并进一步提高了并联机器人逆向运动学问题的计算效率。文献[11]从数值调节和收敛速度角度详细分析了实现六自由度并联机器人的正向及逆向运动学的各种求解方法,同时对多种求解方法的计算复杂度进行了分析,并比较了实际 CPU 的时间消耗,既保证了数值的稳定性,又兼顾了计算速度。文献[12]从实现角度出发,研究了并联机器人的运动学求解问题在数字信号处理技术(Digital Signal Processing,DSP)芯片上实现的可行性与性能,其六自由度机器人的算法集执行时间降低至 0.78 ms,具有较高的实用意义和借鉴价值。文献[13]引入神经网络算法,提出一种并联机器人逆向运动学的求解方法,进一步提高了机器人的控制精度。文献[14]深入讨论了三自由度球面并联机器人的运动学仿真及其计算机辅助设计,给出了相应的计算机实现软件,具有较高的实际意义与推广价值。文献[15]利用经典 Stewart 平台提出了适用于马术模拟器的新型六自由度并联机器人,同时进行了具体的实验和仿真,该研究具有较高的理论意义与实践价值。文献[16]提出适用于通用立体机器人的正向及逆向运动学的求解方法,为主动机器视觉领域研究人员提供了全面且细致的教程,具备一定的原创价值与参考意义。文献[17]对由 3 个平面驱动连杆组成的并联机器人进行了运动学和动力学分析,从而提出了具有较高性能和简单结构的并联机器

人设计方案。相关实验证明该类机器人具有较高的控制精度以及更大体积。文献[18]提出了闭环的逆向运动学(Inverse Kinematics,IK)算法,设计实现了并联机器人的操纵器,克服了末端效应器方向描述导致的表示奇异性问题。文献[19]在几何与代数的框架下提出了并联机器人的机械手运动学计算式,利用柔性方法拓宽基于点或线表示的机器人问题处理方法。文献[20]详细讨论正向运动学求解问题的连续计算方法,为新型机器模型的机理分析及实时控制提供切实的依据。文献[21]在闭式解的基础上提出了一种逆向运动学的并行求解方法,进一步降低了算法的执行时间,对实现并联机器人具有一定参考性。文献[22]运用空间几何学和矢量代数方法建立了三自由度的Delta型并联机器人运动学模型,实现并联机器人的正向运动学求解,从而解决了正向运动学推导过程中较复杂的问题。文献[23]构造了具有六自由度的并联机器人数学模型,实现正向及逆向运动学的求解算法,在仿真实验中观察并讨论操纵器的奇异构型,进而给出相应的仿真结果。文献[24]提出适用于国际热核实验堆的移动并联机器人,并给出正解和反解的运动学分析,从而实现实验堆中的焊接及加工工作。文献[25]使用线性致动器和滑轮系统提出了基于高夫斯图尔特平台的线驱动并联机器人,进一步降低了逆向运动学的求解难度。文献[26]针对工业应用的特定任务,给出了两种可重构并联机器人的设计方案,同时进行了必要的运动学仿真,该方案具有较强的实用性。文献[27]利用刚度模型和Newton-Raphson方法建立了六自由度的兼容双冗余并联机器人模型,进一步提升了并联机器人的运动学性能。文献[28]引入可观测的扩展卡尔曼滤波器,提出了一种腿式机器人的状态估计框架,实现并联机器人的精确状态估计。文献[29]提出了一类基于3-CPS欠驱动拓扑的可重构模块化并联机器人,证明其可以执行纯平移及纯旋转的运动。文献[30]提出适用于Gough型并联机器人的区间分析算法,进一步优化正向运动学问题求解的计算复杂度及稳定性。文献[31]深入研究移动平台尺寸及底座尺寸间的关系,并讨论多项设计参数与基本平台运动间的变化,详细分析了具有三自由度并联机器人的运动学问题,具有一定的理论深度和研究价值。文献[32]基于螺旋理论提出了新型非对称三自由度的并联机器人,并利用MATLAB软件平台进行了必要仿真,兼具一定的理论价值及实践意义。文献[33]总结了并联机器人的研究成果,提出螺旋理论的完整推导和数值结果,完善了并联机器人的运动学分析理论与应用。文献[34]构建考虑滑轮机构的线驱动并联

机器人的运动学模型,显著降低机器人的模型误差,同时提高了并联机器人的控制精度。

3 误差分析

在并联机器人结构中,并联机构的理论与实际位置以及姿态始终存在无法避免的偏差。文献[35]深入研究由材料刚度和制造过程引起的误差,提出适用于国际热核实验堆的新型并联机器人设计方法,显著提高了并联机器人的控制精度。文献[36]在逆向运动学的基础上推导六自由度Stewart平台的雅可比矩阵(Jacobian)以及动力学方程,进而精确估计并联机器人的控制过程误差。文献[37]对具有三自由度的Delta并联机器人进行了详尽的性能评估,为后续研究提供了准确的误差补偿依据,且具有较高的原创价值以及参考意义。文献[38]针对并联机器人系统提出了一种基于混沌反控制的能量降低方法,进一步减小了机器人控制系统的成本和误差,并为后续研究提供了一定的参考意义。文献[39]利用第一类拉格朗日方程推导二自由度平移并联机器人的任务空间动态模型,实现并联机器人非线性动态特性的精准估计,进一步优化了控制设备的跟踪性能。文献[40]对并联机器人的伺服控制器、绞车、电缆、电缆力传感器以及现场总线通信等致动器单元进行了动态分析与系统辨识,并建立具有停滞时间的二阶系统分析模型,从而显著提高了并联机器人的位置精度。文献[41]深入研究和评估了驱动机构对并联机器人的应力影响,从而为机器人的控制精度和运动决策提供更加精确的误差补偿。文献[42]给出了滚珠丝杠驱动的并联机器人数学模型,提出了基于最小跟踪误差的非线性自适应鲁棒控制轨迹跟踪算法,同时实现了并联机器人的高精度及高稳定性。文献[43]设计了模仿人类躯干的并联机器人原型,并使用欧拉-伯努利梁公式(Euler-Bernoulli Beam Theory)分析机器人的非线性误差,进一步提高正向与逆向运动学问题的求解精度。文献[44]利用ADAMS软件构造了六自由度并联机器人的完整虚拟样机模型,深入分析运行速度和载荷变化对并联机器人末端定位精度的影响程度,从而为并联机器人的未来设计提供一定的理论依据与参考。文献[45]深入分析了线驱动并联机器人的集合机构,同时研究了导辊及卷绕机构设计对机器人控制精度误差的影响,进而为并联机器人的误差补偿提供了更多依据。文献[46]重点研究了索杆复合驱动的并联码垛机器人的机构设计、动力学建模和误差分析,有效提高了并联机器人的运动性能及承载能力,进一步提升其工作效率与控制精度。文献[47]利用性能图表方法

提出一种并联机器人的运动学设计的优化方法,从而设计出简单且稳定的多目标运动学问题计算框架。文献[48]通过引入蒙特卡洛算法(Monte Carlo Method),对线驱动并联机器人的灵敏度进行了深入讨论及分析,构建了并联机器人的误差估计模型,进一步降低并联机器人的缆绳长度与滑轮几何误差,具有一定的参考价值。

4 结束语

针对具有多自由度的并联机器人控制技术,本文分别从并联机器人的运动学分析和误差分析等角度出发,深入回顾及分析了当前相关控制技术的研究思路与发展趋势。根据并联机器人的研究现状和成果可知,在并联机器人的研究中,提高正向与逆向运动学问题的求解质量是并联机器人研究领域的核心问题,其求解精度对并联机器人的控制精度具有直接影响。尽管当前已经对正向和逆向运动学进行了深入研究,但其计算模型仍存在较大的控制误差,这意味着并联机器人的控制精度依然存在较大提升以及优化空间。此外,与正解和反解问题的求解研究相比,并联机器人的误差分析热度偏低,研究成果也少于运动学研究方向,但该方向对于优化并联机器人的控制技术同样具有较大的研究意义与理论价值,主要表现在精确地控制误差估算可以大幅提升并联机器人的误差补偿水平,从另一角度提升并联机器人的控制精度。总之,在人工智能技术逐渐发展与普及的背景下,并联机器人的控制技术将较大地提升社会工业生产的规模和效率,同时存在广阔的发展空间及潜力。并联机器人的研发仍处于较低水平,因此通过细化并联机器人的运动学分析来提高正解和反解问题的求解质量,或通过提升并联机器人的误差分析水平以增强其控制的精确程度将成为相关研究领域的重点及热点问题。相关研究水平直接影响并联机器人的工作效率与应用规模,故具有较大的理论意义与经济价值。

参考文献

- [1] Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers ,1965 ,180(1) :1 – 12.
- [2] Hunt E. Mechanics of verbal ability [J]. Psychological Review ,1978 ,85(2) :109 – 130.
- [3] Maccallion H ,Pham D T. The analysis of a six dof workstation for mechanized assembly [J]. Theory of Machines and Mechanisms ,Montreal ,1979 ,7(1) :1 – 14.
- [4] Mohamed M G. A direct determination of the instantaneous kinematics of fully parallel robot manipulators [J]. Journal of Mechanical Design ,1985 ,107(2) :226 – 229.
- [5] Lee C ,Chang P R. Efficient parallel algorithm for robot inverse dynamics computation [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics ,1986 ,16(4) :532 – 542.
- [6] Hunt K H. Robot kinematics – a compact analytic inverse solution for velocities [J]. Journal of Mechanical Design ,1987 ,109(1) :42 – 49.
- [7] Zhang H ,Paul R P. A parallel solution to robot inverse kinematics [C]. Birmingham: IEEE International Conference on Robotics & Automation ,1988: 31 – 40.
- [8] Chen C ,Lee C. A design of pipelined architecture for computing robot direct kinematics [C]. Austin: Symposium on Circuits & Systems ,1989: 56 – 68.
- [9] Li Z. Geometrical consideration of robot kinematics [J]. International Journal of Robotics and Automation ,1990 ,5(3) :139 – 145.
- [10] Zhang H ,Paul R P. A parallel inverse kinematics solution for robot manipulators based on multiprocessing and linear extrapolation [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation ,1991 ,7(5) :660 – 669.
- [11] Tandirci M ,Angeles J ,Darcovich J. The role of rotation representations in computational robot kinematics [C]. Boise: IEEE International Conference on Robotics & Automation ,1992: 117 – 126.
- [12] Drake B W ,Hsia T. Implementation of a unified robot kinematics and inverse dynamics algorithm on a DSP chip [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,1993 ,40(2) :273 – 281.
- [13] Kuroe Y ,Nakai Y ,Mori T. A new neural network learning of inverse kinematics of robot manipulator [C]. Carson City: IEEE World Congress on IEEE International Conference on Neural Networks ,1994: 1011 – 1023.
- [14] Clement M G. Simulation and computer – aided kinematic design of three – degree – of – freedom spherical parallel manipulators [J]. Journal of Robotic Systems ,1995 ,12(12) :857 – 869.
- [15] Amirat Y ,Francois C ,Fried G ,et al. Design and control of a new six DOF parallel robot: Application to equestrian gait simulation [J]. Mechatronics ,1996 ,6(2) :227 – 239.
- [16] Sharkey P M ,Murray D W ,Heuring J J. On the kinematics of robot heads [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation ,1997 ,13(3) :437 – 442.
- [17] Ben – Horin R ,Shoham M ,Djerassi S. Kinematics ,dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot [J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing ,1998 ,14(2) :163 – 172.
- [18] Chiaverini S ,Siciliano B. The unit quaternion: A useful tool for inverse kinematics of robot manipulators [J]. Systems Analysis Modelling Simulation ,1999 ,35(1) :45 – 60.
- [19] Bayro – Corchoano E ,Kähler D. Motor algebra approach for computing the kinematics of robot manipulators [J]. Journal

- of Robotic Systems 2000, 17(9) : 495 – 516.
- [20] Dong B ,Zhang X D. Continuation method applied in kinematics of parallel robot [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition) 2001, 12(1) : 1422 – 1428.
- [21] Zhang H ,Paul R P. A parallel inverse kinematics solution for robot manipulators based on multiprocessing and linear extrapolation [C]. Chicago: IEEE International Conference on Robotics & Automation 2002: 1789 – 1796.
- [22] 赵杰,朱延河,蔡鹤皋. Delta型并联机器人运动学正解几何解法 [J]. 哈尔滨工业大学学报 2003(1) : 25 – 27.
Zhao Jie ,Zhu Yanhe ,Cai Hegao. Geometric solution for direct kinematics of delta parallel robot [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2003(1) : 25 – 27.
- [23] Arshad M ,Khan T M ,Choudhry M A. Solution of forward kinematics model of six degrees of freedom parallel robot manipulator [C]. Houston: Proceedings of the IEEE Symposium on Emerging Technologies 2005: 766 – 780.
- [24] Pessi P ,Wu H ,Handroos H ,et al. A mobile robot with parallel kinematics to meet the requirements for assembling and machining the ITER vacuum vessel [J]. Fusion Engineering and Design 2007, 82(15 – 24) : 2047 – 2054.
- [25] Merlet J P. Kinematics of the wire – driven parallel robot MARIONET using linear actuators [C]. Kansas City: IEEE International Conference on Robotics & Automation ,2008: 669 – 676.
- [26] Pisla D ,Plitea N ,Vidrean A ,et al. Kinematics and design of two variants of a reconfigurable parallel robot [C]. Holunono: Asme/Iftomm International Conference on Reconfigurable Mechanisms & Robots 2009: 466 – 480.
- [27] Yuan Y ,Li Y. Design and analysis of a novel 6 – DOF redundant actuated parallel robot with compliant hinges for high precision positioning [J]. Nonlinear Dynamics 2010, 61(4) : 829 – 845.
- [28] Bloesch M ,Hutter M ,Hoepflinger M H ,et al. State estimation for legged robots – consistent fusion of leg kinematics and IMU [J]. Robotics Science and Systems 2012(7) : 533 – 541.
- [29] Carbonari L ,Callegari M ,Palmieri G ,et al. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines science direct [J]. Mechanism and Machine Theory 2014, 79(2) : 173 – 183.
- [30] Merlet J P. Solving the forward kinematics of a Gough – Type parallel manipulator with interval analysis [J]. International Journal of Robotics Research ,2016, 23(3) : 221 – 235.
- [31] Jha R ,Chablat D ,Baron L. Influence of design parameters on the singularities and workspace of a 3 – RPS parallel robot [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering 2018, 42(1) : 30 – 37.
- [32] Gao P ,Li B ,Wen X ,et al. Kinematics and workspace analysis of a new 3 – DOF parallel robot [C]. Houston: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation ,2020: 897 – 907.
- [33] Szucs L ,Galambos P ,Drexler D A. Kinematics of Delta – typeparallel robot mechanisms via screw theory: A tutorial paper [C]. Harrisburg: IEEE the Nineteenth World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics 2021: 507 – 516.
- [34] Zhang Z ,Xie G ,Shao Z ,et al. Kinematic calibration of cable – driven parallel robots considering the pulley kinematics [J]. Mechanism and Machine Theory 2022, 169(1) : 1 – 13.
- [35] Wang Y ,Pessi P ,Wu H ,et al. Accuracy analysis of hybrid parallel robot for the assembling of ITER [J]. Fusion Engineering & Design 2009, 84(7 – 11) : 1964 – 1968.
- [36] Hajimirzaalian H ,Moosavi H ,Massah M. Dynamics analysis and simulation of parallel robot Stewart platform [C]. Cincinnati: International Conference on Computer & Automation Engineering 2010: 387 – 399.
- [37] Stan S D ,Manic M ,Szep C ,et al. Performance analysis of 3 DOF Delta parallel robot [C]. St. Louis: International Conference on Human System Interactions 2011: 836 – 849.
- [38] Yaghoubi Z ,Zarabadipour H ,Shoorehdeli M A. Energy reduction with anticontrol of chaos for nonholonomic mobile robot system [J]. Abstract & Applied Analysis 2012(6) : 1 – 7.
- [39] Zhang G ,Wu J ,Liu P ,et al. Dynamic analysis and model – based feedforward control of a 2 – DoF translational parallel manipulator driven by linear motors [J]. Industrial Robot ,2013, 40(6) : 597 – 609.
- [40] Kraus W ,Schmidt V ,Rajendra P ,et al. System identification and cable force control for a cable – driven parallel robot with industrial servo drives [C]. Seattle: IEEE International Conference on Robotics & Automation 2014: 521 – 536.
- [41] Borchert G ,Battistelli M ,Runge G ,et al. Analysis of the mass distribution of a functionally extended delta robot [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing ,2015 ,31(2) : 111 – 120.
- [42] Negahbani N ,Giberti H ,Fiore E. Error analysis and adaptive – robust control of a 6 – DoF parallel robot with Ball – screw drive actuators [J]. Journal of Robotics 2016, 1(1) : 1 – 15.
- [43] Wu G ,Shi G ,Shi Y. Modeling and analysis of a parallel continuum robot using artificial neural network [C]. Topeka: IEEE International Conference on Mechatronics 2017: 59 – 67.
- [44] 叶蓓,郭子昂,赵振平,等.六自由度并联机器人动力学仿真与位置误差分析 [J]. 机械制造 2018, 56(6) : 38 – 40.
Ye Bei ,Guo Ziang ,Zhao Zhenping ,et al. Dynamics simulation and position error analysis of a six – degree – of – freedom parallel robot [J]. Machinery 2018, 56(6) : 38 – 40.
- [45] Maloletov A V ,Fadeev M Y ,Klimchik A S. Error analysis in solving the inverse problem of the Cable – driven parallel underactuated robot kinematics and methods for their elimination [J]. IFAC – Papers on Line 2019, 52(13) : 1156 – 1161.
- [46] Sun H ,Zhang Y ,Xie B ,et al. Dynamic modeling and error analysis of a Cable – linkage Serial – parallel palletizing robot [J]. IEEE Access 2020, 9(1) : 2188 – 2200.

- [47] Sanjuan J ,Munoz E ,Serje D ,et al. Methodology for the design of parallel robots using performance atlases: The case of the linear Delta parallel robot [C]. Salt Lake City: The Eighteenth International Multi – Conference on Systems ,Signals & Devices 2021: 1903 – 1919.
- [48] Li J Zhao Y ,Tang Q ,et al. Conceptual design and error analysis of aCable – driven parallel robot [J]. Robotica ,2022 ,40(7) : 2152 – 2167.