

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.002

XY-3-RPS 混联机器人设计和运动学仿真

王吉栋, 王 顺, 温勇壮, 宋孝宗

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:为实现人工骨关节表面抛光的自动化,课题组充分利用串并联机构之间的机构特性优势互补的特点,设计了一种 XY-3-RPS 混联人工骨关节抛光机器人,该混联机器人具有 5 个自由度。笔者搜索了并联机构和混联机构的工作空间;对比分析了基于正逆运动学的支链位置变化曲线;在并联机构欧拉角表示法及运动学理论的基础上建立了混联机构运动学数学模型,并利用 MATLAB 及 ADAMS 进行仿真验证。结果表明机构正逆运动学曲线吻合,运动稳定。该混联机构完全满足抛光人工骨关节表面的运动及工作范围要求。

关 键 词:人工骨关节抛光机器人;混联机构;欧拉角表示法;MATLAB;ADAMS

中图分类号:TP242;TH781

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)06-0005-06

Design and Kinematics Simulation of XY-3-RPS Hybrid Robot

WANG Jidong, WANG Shun, WEN Yongzhuang, SONG Xiaozong

(School of Mechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the automation of artificial bone joint surface polishing, a XY-3-RPS hybrid artificial bone joint polishing robot with 5 degrees of freedom was designed by taking full advantage of the complementary characteristics of the series and parallel mechanisms. The working space of parallel mechanism and hybrid mechanism was consulted and the position change curve of branch chain based on forward and inverse kinematics was compared and analyzed. On the basis of Euler angle representation method and kinematics theory of parallel mechanism, the kinematics mathematical model of the mixed mechanism was established, and the simulation and verification was carried out by Matlab and ADAMS. The results show that the forward and inverse kinematic curves are consistent and the motion is stable, which proves that the hybrid mechanism can completely meet the requirements of the motion and working range of the polished artificial bone joint surface.

Keywords: artificial bone joint polishing robot; hybrid robot; Euler angle representation method; MATLAB; ADAMS

Stewart 6 自由度并联飞行模拟器由工程师 Stewart 于 1965 年设计而成,并联机构这种新的机构形式由此而生^[1]。国内外学者针对 Stewart 平台的拓扑构型、运动学、动力学特性和控制理论等进行了大量研究,取得了巨大的研究成果。王启明在 L-M 算法的基础上提出了基于 Stewart 并联平台正交初值补偿算法,大大提高了数值仿真的收敛速度^[2]。经过几十年的发展,并联机构已广泛应用于飞船对接、各类并联机床、医用微动并联机器人及精密定位系统等。因为并联机构的高稳定性和低累积误差特点,近几年也逐渐被应用于抛光加工领域。由于 6 自由度并联机构工作空间过小且

支链干涉严重,不利于实用性推广,因此具有更少支链数目的少自由并联机构发展迅速。3 自由度并联机构具有少自由度并联机构的很多优点^[3]。Codourey 对 Delta 机构的构型设计及运动学特性进行了相关研究^[4]。刘善增分析了 3-RPS 并联机构的运动学和动力学特性^[5]。与串联机构相比,并联机构结构稳定,刚度性能优越,精度高,具有比较小的累积误差且运动学逆解简单,在此基础上,结合串联机构大行程优点,将串联机构和并联机构结合组成混联机构是目前国内外研究的热点,根据加工任务要求对串并联部分进行设计,既保证了加工需要,又充分利用了串联机构和少

收稿日期:2020-06-30;修回日期:2020-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51565031)。

第一作者简介:王吉栋(1996),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为混联抛光机床。通信作者:宋孝宗(1981),男,甘肃会宁人,博士,副教授,主要研究方向为光滑表面加工技术。E-mail:songxiaozong@126.com

自由度并联机构的结构特性互补关系。在运动学、动力学及控制理论的研究方面也取得了较大进展。高云峰等在包络理论的基础上,分析了混联机构局部关节联动运动的包络面,并分析了混联机构的灵活工作空间^[6]。李菊等设计了一种 5 自由度串并联多喷枪机器人,并对它的运动学、动力学及控制策略进行了仿真分析^[7]。现阶段,国内外对混联机构相关理论的研究仍然缺少系统性理论。面向不同加工领域下的各种串并联搭配的新结构还有巨大的发展潜力和研究价值。并联机构具有高精度和高稳定性的特点,在微动领域和微型机构中得到了广泛应用^[8],例如少自由度气囊抛光加工机床、5 自由度混联轮毂表面复杂曲面抛光等。

基于目前人工骨关节表面抛光的自动化需求,课题组设计了一种基于 XY-3-RPS 微型 5 自由度混联抛光机器人, X/Y 指可以实现 X 和 Y 方向移动到十字串联平台, R 为转动副, P 为移动副, S 为球面副。文中重点推导混联机构的运动学数学模型,并在此基础上使用 MATLAB 和 ADAMS 软件对其自由度、工作空间、正逆运动学位置曲线进行了仿真,为这种微型混联抛光机器人的实际应用提供了参考。

1 混联机器人的数学模型及运动学逆解

1.1 构型分析及自由度计算

XY-3-RPS 构型主要由水平布置的十字串联运动平台和具有 2 转 1 移 3 个自由度的 RPS 并联机构组成,其中串联平台可以实现 X, Y 方向的移动,并可通过 3 条支链连接动、定平台,带动并联机构定平台同步运动,图 1 所示为混联机构结构简图。

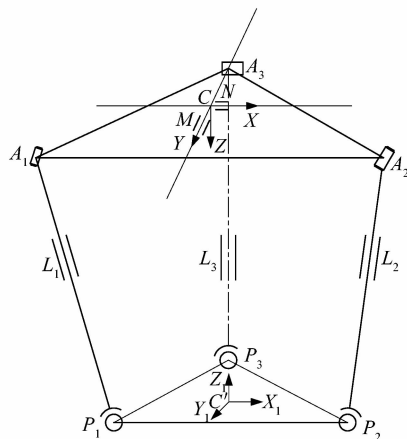


图 1 混联机构结构简图

Figure 1 Schematic diagram of hybrid mechanism

图 1 中 M, N 分别表示该串联部分在 Y, X 方向上的移动副,在 X 平台中心添加一全局坐标系 O-X₀Y₀Z₀, M

位于 N 下方,并联机构定平台中心位于全局坐标系坐标原点下方 50 mm 处,定平台上的 3 个铰点分别用 A₁, A₂, A₃ 表示,定坐标系 C-XYZ 的原点位于定平台几何中心处,且与全局坐标系的 Z 向距离为 50 mm,定平台的初始位置与 M 副中心位置重合, N 副中心距全局坐标系坐标原点的 Z 向距离定为 25 mm, X 轴与 A₁A₂ 平行, Z 轴垂直于 M, N 所在平面向下, Y 轴由右手定则确定。动坐标系 C'-X₁Y₁Z₁ 位于动平台的几何中心,初始位姿默认与 C-XYZ 重合。定平台上 3 个转动副铰点连线为外接圆直径为 200 mm 的等边三角形,边长为 L。每条支链由上下连杆组成,通过移动副连接,分别用 L₁, L₂, L₃ 表示,球副位于动平台外接圆直径 l 为 100 mm 的等边三角形顶点处,分别用 P₁, P₂, P₃ 表示。经分析,该混联机构由 10 个构件, 3 个转动副, 3 个移动副和 3 个球副,共 9 个运动副组成,不存在冗余约束,根据经典 Grubler-Kutzbach 自由度计算公式,即

$$F = \lambda(\eta - g - 1) \sum_{i=1}^j k_i + v. \quad (1)$$

式中: F 为机构的自由度; λ 为空间自由度; η 为机构的包括基连杆在内的连杆总数; j 为机构的运动副数目; k_i 为第 i 个运动副的自由度数; v 为机构的冗余约束; g 为关节数。

$$F = 6 \times (10 - 11 - 1) + 17 = 5. \quad (2)$$

经计算可得该混联机构共有 5 个自由度,分别是串联部分 X, Y 方向上的移动自由度和并联部分 Z 方向上的移动自由度及绕 X, Y 轴的转动自由度,满足抛光人工骨关节复杂曲面的自由度要求。

1.2 混联机构运动学逆解

由图 1 知, X 平台上移动副 N 在全局坐标系下位置坐标为 $\mathbf{n} = [x, 0, 25]^T$, Y 平台上移动副 M 在全局坐标系下位置坐标为 $\mathbf{m} = [0, y, 50]^T$, 定平台铰点在定坐标系 C'-XYZ 内坐标和动平台铰点在动坐标系 C'-X₁Y₁Z₁ 分别为:

$$[{}^c A_1, {}^c A_2, {}^c A_3] = \begin{bmatrix} -L/2 & \sqrt{3}L/6 & 0 \\ L/2 & \sqrt{3}L/6 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}L/3 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$[{}^c P_1, {}^c P_2, {}^c P_3] = \begin{bmatrix} L/2 & \sqrt{3}l/6 & 0 \\ l/2 & \sqrt{3}l/6 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}l/3 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中: L 为定平台转动副铰点连线构成的三角形边长; l 代表动平台球关节铰点连线构成的三角形边长。

混联机构的姿态变化可以采用欧拉角表示法进行

表示。绕 X, Y, Z 轴转动的角度分别用 α, β, γ 表示,即动坐标系绕定坐标系的俯仰角、滚动角和偏转角,分别用 $R_\alpha, R_\beta, R_\gamma$ 表示:

$$R_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad (5)$$

由于动平台绕固定坐标系旋转,故其旋转矩阵为:

$${}^cR = R_\gamma \times R_\beta \times R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

混联机构的运动形式主要由并联机构定平台相对于全局坐标系 $O-X_0Y_0Z_0$ 沿 X, Y 方向上的平移和并联机构动平台绕 X, Y 轴旋转及 Z 轴平移耦合而成, n_z 为移动副 N 的 Z 向坐标分量,球铰铰点在定坐标内位置坐标 ${}^cP_i = [X_d, Y_d, Z_d]$, 则

$${}^cP_i = {}^cR \times {}^{c'}P_i + m + n + Z_w - n_z \quad (9)$$

同理,定平台第 i 个铰点在固定坐标系的方位坐标用 ${}^cP_{A_i} = [x_D, y_D, z_D]$ 表示,则

$${}^cP_{A_i} = {}^cA_i + m + n - n_z \quad (10)$$

并联机构的逆向运动学求解原理是在给定动平台末端位姿驱动参数的前提下,经过欧拉角变换,将动平台内相对于动坐标系内各铰点坐标转化为相对于定坐标系的坐标值,然后根据并联机构的杆长求解公式求解得到在给定位姿下的驱动关节位移变化参数。 m, n 可理解为 2 个独立的串联方位变量且运动规律与定平台几何中心同步,既能体现动平台 5 个自由度的运动规律,又不影响末端位姿与驱动关节之间的函数关系,故并联机构的传统逆解计算方法对该混联机构仍然适用,则混联机构杆长公式为:

$$L_i = |{}^cP_i - {}^cP_{A_i}| = |{}^cR_i \times {}^{c'}P_i + Z_w - {}^cP_{A_i}| \quad (11)$$

至此,混联机构数学模型的建立、自由度计算及逆向运动学求解便全部完成,为接下来使用 MATLAB 求解工作空间及使用 ADAMS 进行的正逆解运动学仿真奠定了基础。

2 基于 MATLAB 的混联机构工作空间分析

混联机构的工作空间定义与并联机构相同,以 XY-3-RPS 混联射流抛光运动平台为例,指在混联平台正常工作时,动平台上的射流抛光喷孔中心所能到达的所有点的集合。其类型可分为 3 大类:可达工作空间、灵活工作空间和全局工作空间^[9-10]。其中可达工作空间是衡量混联机构运动性能的常用标准。在混联机构数学模型基础上,采用 MATLAB 软件编写 for 循环与 if 语句嵌套的工作空间求解代码,采用极限边界

$$R_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$R_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

搜索法搜索并绘制 3-RPS 并联机构与 XY-3-RPS 混联机构的所有有效点的三维模拟图。

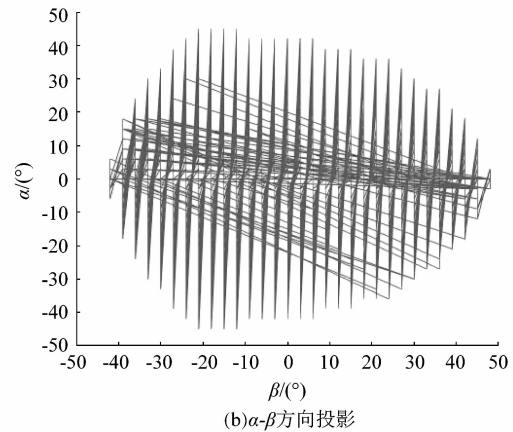
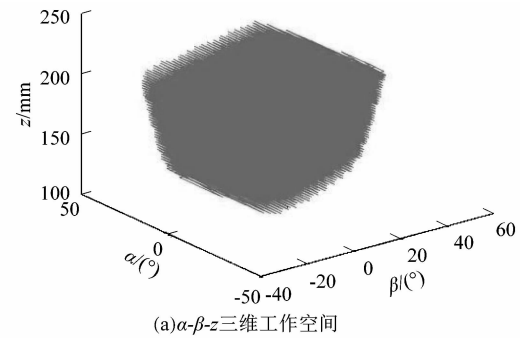


图 2 3RPS 三维工作空间

Figure 2 Three-dimensional working space of 3RPS

从图 2 可以看出,该并联机构工作空间具有中间宽,两头窄的特点, α, β 最大转角均为 45° ,可见并联机构工作空间受支链长度与关节转角限制的影响,因此应将动平台工作高度尽量控制在 $150 \sim 200 \text{ mm}$ 以充分利用混联机器人的工作空间。图 3 表示混联机构的可达工作空间,其中包括了在可达行程内的任一 X, Y 坐标下的并联部分的位姿工作空间,很明显在添加串联平台后,该机构的工作空间大大增加,完全满足 $0 \sim 200 \text{ mm}$ 内人工关节的表面包括股骨托在内的抛光工作要求,大大提高了并联机构在复杂曲面抛光领域的

实用价值。

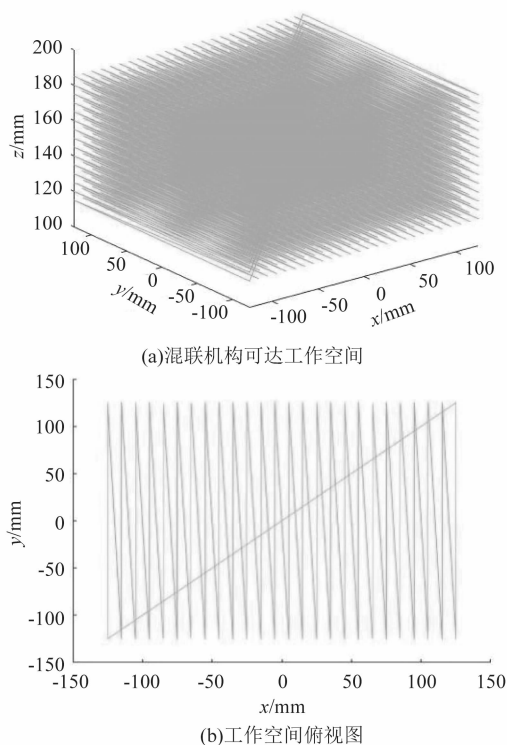


图 3 XY-3-RPS 三维工作空间

Figure 3 Three-dimensional working space of XY-3-RPS

3 基于 ADAMS 的正逆运动学仿真

3.1 混联机构虚拟样机建立及自由度验证

课题组使用 SolidWorks 软件建立混联机构的零件三维模型并组装成装配体,该机构 N 平台与机架主体固定,串联十字平台和定平台的长度与宽度相同,内部装配 FYC₂D-2004 滚珠丝杠模型。整机模型如图 4 所示,将装配体文件转化为 Parasolid 文件,导入 ADAMS 前处理模块并删除对仿真结果不产生任何影响的 Part,建立简化虚拟样机模型。

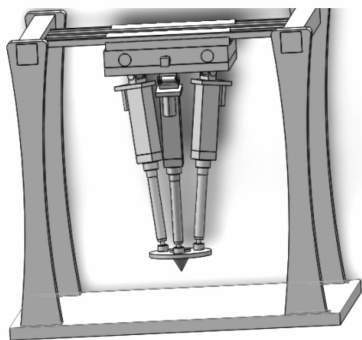


图 4 XY-3-RPS 混联机构三维模型

Figure 4 3D model of XY-3-RPS hybrid machine

如图 5 所示,在前处理模块中,简化不必要结构,在 N 平台处添加固定副与 Ground 固接,并添加运动副约束。选取位移驱动,选择 luomu1 的 marker 点添加驱动,在 luomu2 上添加相同驱动,选取多点驱动 Motion,选取喷头中心点 Marker_131,然后选择 Ground,即在动平台与大地之间添加完成末端位姿驱动。调出 ADAMS 自检模块验证虚拟样机约束关系及驱动添加是否正确并验证式(2)中得出的自由度,自由度验证结果如图 6 所示,自由度计算正确。

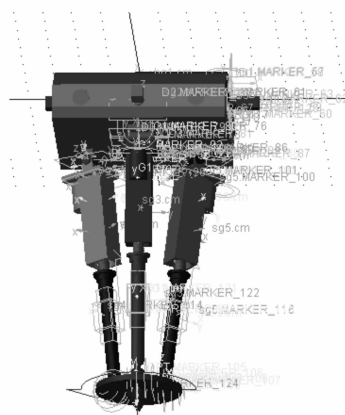


图 5 虚拟样机模型

Figure 5 Virtual prototype model

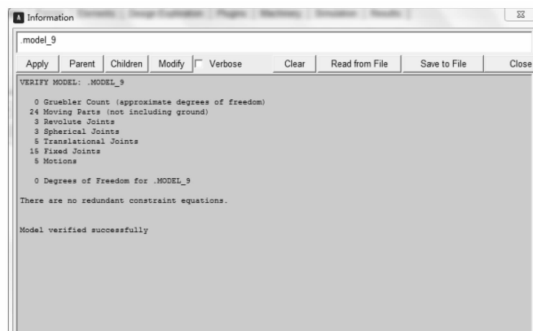


图 6 自由度验证

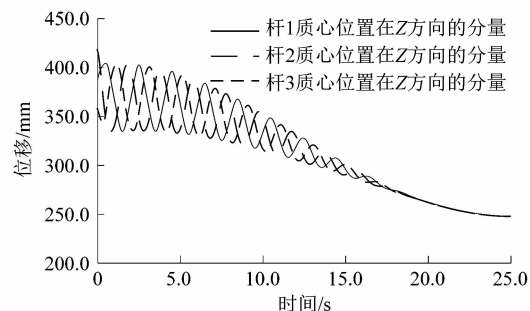
Figure 6 Degree of freedom verification

3.2 运动学逆解仿真

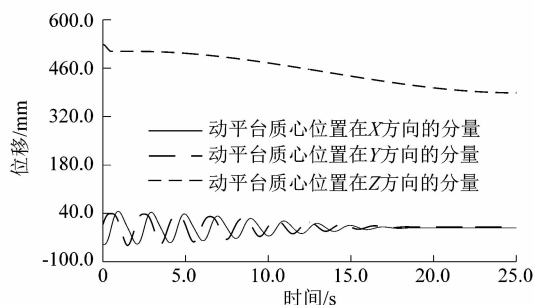
选取位移驱动 motion,单击 luomu1 关节 marker 点添加位移驱动,在 luomu2 上添加相同位移驱动,选取多点驱动图标,单击喷头中心点 Marker_100,然后单击 Ground,即在动平台与大地之间添加完成末端位姿驱动。双击 motion 打开驱动函数设置界面,将 Type 中 Tra Z, Rot X, Rot Y 由 free 状态改为 disp 状态,设定最大运动行程为 100 mm,最大转角为 45°,模拟抛光人工髋关节表面时的运动路径,设定运动轨迹为渐变螺旋曲线的驱动函数,时间驱动函数为:

Tra X:STEP(time,0,50 * cos(pi * time),25,0);
 Tra Y:STEP(time,0,-50 * sin(pi * time),25,0);
 Rot X:STEP(time,0,pi/4 * sin(pi * time),20,0);
 Rot Y:STEP(time,0,pi/4 * cos(pi * time),20,0);
 Tra Z:STEP(time,0,0,0.5,-20) + STEP(time,2,0,20,-120)。

设置仿真时间为 25 s,步数为 1 000,即可求出 5 个移动副的逆运动学位移变化曲线,如图 7 所示。



(a)运动学逆解杆长变化规律



(b)动平台逆解位移变化规律

图 7 混联机构的逆运动学变化规律

Figure 7 Inverse kinematic variation law of hybrid mechanism

由图 7 可知,在完成预设轨迹运动的过程中,各杆及运动副运动曲线均稳定变化,未发生不符合机械运动规律的突变,满足抛光人工关节复杂曲面的任务要求。其动平台喷头中心运动轨迹如图 8 所示。

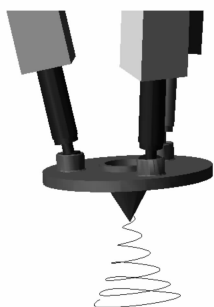
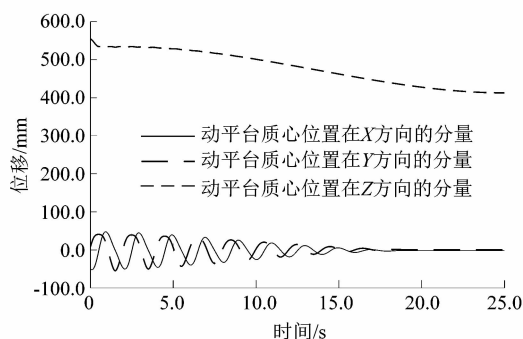


图 8 喷头运动轨迹

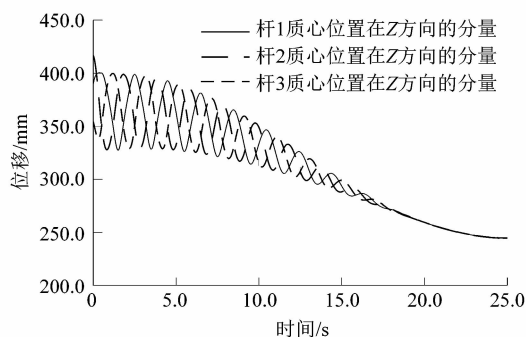
Figure 8 Trace of sprinkler head

3.3 渐变螺旋轨迹的运动学正解仿真

基于 ADAMS 软件,在混联机构逆运动学仿真曲线的基础上,在后处理模块中选取各运动副 maker 点轴向坐标,输出对应仿真时间的各铰链位移变化的文本数据,并在前处理模块中单击 Import 导入文本数据生成对应样条曲线,将位于抛光喷头上的末端位姿驱动删除,分别在 5 个移动副上添加驱动 motion,将生成的样条曲线添加到驱动函数 AKISPL(time,0,Spline_i,0)的 Spline_i 位置,设置仿真时间为 25 s,步数为 1 000,即可完成正运动学仿真,仿真结果如图 9 所示。打开后处理模块,调取动平台在 X,Y 及 Z 方向上的运动曲线和 3 条支链的位移变化曲线,与图 7 中逆运动学仿真曲线对比分析。结果表明该混联机构正逆运动变化曲线完全吻合,未出现奇异现象及明显误差,为动力学分析及控制系统设计提供了参考。



(a)动平台正运动学位置变化规律



(b)支链的正运动学位移变化规律

图 9 混联机构的正运动学变化规律

Figure 9 Forward kinematic variation law of hybrid mechanism

4 结语

课题组基于 XY-3-RPS 新构型设计了一种微型混联射流抛光机器人,实现对人工骨关节表面的抛光加工。在国内外 RPS 并联机构已有研究理论的基础上,实现了串并联结合的构型创新并使用欧拉角变换法建

立了混联机构的逆运动学数学模型,但仍缺乏对混联机构的正运动学数学模型的建立方法。使用 MATLAB 软件进行工作空间求解,发现与 RPS 并联机构工作空间相比,混联机构的工作空间范围大大增加。使用 SolidWorks 软件建立其模拟机构,导入 ADAMS 生成虚拟样机并进行了正逆运动学仿真,验证了该机构的自由度及运动时的动态稳定性,通过仿真分析,证实了逆运动学数学模型的正确性。根据加工任务要求设定了螺旋曲线运动轨迹函数并运行得到喷头加工轨迹曲线,验证了其应用于复杂曲面抛光的可行性。采用理论分析与仿真验证结合的方法,为以后针对该混联机构动力学分析工作和混联抛光机器人在人工骨关节射流抛光领域的实用性推广提供了正确的参考依据。针对此混联机构,仍可进一步研究运动学正解数学模型的建立方法。可深入研究其动力学特性和探索一种有效的系统控制策略。

参考文献:

- [1] STEWART D. A platform with 6 degree of freedom[J]. Proceedings of Institute of Mechanical Engineering, 1965, 180(15): 371 - 386.
- [2] 王启明, 苏建, 张兰, 等. 基于 L-M 算法的正交 Stewart 平台位姿正解的初值偿[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 97 - 104.
- [3] 刘锋, 陈文凯. 3 自由度并联机器人的研究现状和应用前景[J]. 企业技术开发, 2006, 25(1): 9 - 10.
- [4] CODOUREY A. Dynamic modeling and mass matrix evaluation of The Deltaparallel robot for axes decoupling control [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Osaka, Japan: IEEE, 1996: 1211 - 1218.
- [5] 刘善增. 3 自由度并联机器人的运动学与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 11 - 17.
- [6] 高云峰, 吕明睿, 周伦, 等. 一种五自由度混联机器人运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(7): 1 - 7.
- [7] 李菊, 赵德安, 沈惠平, 等. 多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 216 - 220.
- [8] 黄真. 并联机器人及其机构学理论[J]. 燕山大学学报, 1998, 22(1): 13 - 16.
- [9] 尹红梅. 3-RPS 并联机床运动学分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2013: 26.
- [10] 史革盟. 球面三自由度并联机构瞬时运动分析[J]. 机电工程, 2019, 36(1): 7 - 12.
- [16] 张寒松, 晏华, 丁丁. 脂肪酸对磁流变液沉降稳定性影响的研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(5): 218.
- [17] 熊晨熙, 彭向和, 易成建. 采用油酸和月桂酸改进磁流变液稳定性的实验研究[J]. 功能材料, 2011, 42(8): 1504.
- [18] 朱婉宁, 佟昱, 于秀丽, 等. 纳米铁颗粒磁流变液的制备及性能[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(1): 60 - 65.
- [19] 程海斌, 瞿伟廉, 张剑, 等. 磁流变液及其阻尼器的制备与性能研究[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 811 - 813.
- [20] 陶剑青, 程海斌, 李祥辉. 纳米复合磁流变液的流变特性[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(3): 26 - 28.
- [21] 胡林, 付伟, 张朝平, 等. 磁流变液沉降稳定性改进及对流变性能的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2001, 18(3): 176 - 181.
- [22] GORODKIN S R, KORDONSKI W, MEDVEDEVA E V, et al. A method and device for measurement of a sedimentation constant of magnetorheological fluids [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6): 2476.
- [23] 陈乐生, 陈大跃, 黄震宇, 等. 电感法测量磁流变液沉降系数的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2002(10): 50 - 52.
- [24] NGATU G T, WERELEY N M. Viscometric and sedimentation characterization of bidisperse magnetorheological fluids [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2474 - 2476.
- [25] FAN Yuqin, LIAO Changrong, XIE Lei, et al. Piezo-capacitive behavior of a magnetically structured particle-based conductive polymer with high sensitivity and a wide working range[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(20): 5401 - 5411.
- [26] 邵向阳. 电容式磁流变液悬浮稳定性测试装置研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 16.
- [27] 李星, 李虹. 悬浮液透光率脉动检测原理[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(5): 39 - 43.
- [28] 江万权, 朱春玲, 陈祖耀, 等. 微米级浓悬浮体系中粒子的沉降稳定性及其表征方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(6): 32 - 36.

(上接第4页)