

一种新型三平移并联机器人设计及位置逆解分析

占晓煌¹ 王红州¹ 邹晓晖¹ 陈润六¹ 郑小民²

(1 江西省机械科学研究所 江西 南昌 330002; 2 江西制造职业技术学院 江西 南昌 330095)

摘要: 本文通过对 Delta 机构及其演化机构进行综合研究, 提出了一种新型三平移并联机器人, 该新型并联机器人主要由静平台、支链和动平台三部分组成, 静平台和动平台之间采用三组并联支链相连, 每组支链由 2 个广义 UPU 类构成, 且每组支链中的 2 个 P 副为同步运动驱动副。通过解析法得到了该机构的位置逆解方程。运用 SolidWorks 和 MATLAB 对机构的运动学仿真, 验证了运动学逆解模型的正确性, 并为后续动力学研究奠定基础。

关键词: 并联机器人; 三平移; 位置逆解; 仿真

0 引言

在许多工业领域生产线上有这样一种任务场景, 就是将货物从一个工位搬运至另一个工位上, 而且在搬运过程中始终要保证物品姿态不发生变化。该任务场景使用三自由度机器人就可以满足需要。三自由度的三平移并联机器人因结构简单、控制不复杂而有较高实用价值。1988 年 Clavel 提出了著名的三平移 Delta 机器人; STOCK 等研究了 Delta 机构的衍生机构; Tsai 和黄真等研究了 3-UPU 型三平移并联机构; 尹小琴研究了 3-RRC 型三平移机构; ZHAO 对 3T 并联机器人进行了研究; ZENG 等、LEE 等对一种 UPR 三平移并联机器人进行了分析; 沈惠平等研究了一种零耦合度三平移并联机构。

本文提出了一种新型的三自由度平移并联机器人机构, 该机构采用了基于同步带驱动的运动支链, 运动支链末端铰链中心在运动平台上形成一个空间四面体, 减小了因工作阻力作用点与运动支链末端铰链点的距离产生的弯矩, 提高了机构抵抗冲击载荷的能力。

1 并联机器人的设计

现在的串联机器人技术比较成熟, 可以满足大多数场合需求, 但串联机器人占位空间也较大, 在小工位场景中难于应用。为了减少机器人的横向占地面积并提高其竖直方向的运动空间, 本文分析 Delta 机构和 Diamond 机构等的结构特点, 运用虚链机构法 [16] 和构型综合对 3-UPU、3T、3-UPR、3-RRC 机构及其变异演化机构研究, 提出了一种新型三平移并联机器人, 新型并联机器人主要由静平台、运动支链和动平台三部分组成。静平台和动平台之间采用三组并联支链相连, 且每组支链中由 2 个协同运动的 P 副构成。图 1 展示的是并联机器人支链概念图。

支链作为连接静平台和动平台的部件, 主要由与静平台相连的转动副 (R)、平行四边形机构 (4R)、2 组同步伸缩的移动副 (P) 和与动平台相连的转动副 (R) 构成。支链简图如图 2 所示。A、B、C 和 D 为平行四边形机构 (4R) 的四个转动中心, AB、BC、CD、DA 为其四条边, AD 可绕静平台转动, AB 杆和 CD 杆上有两平行可同步移

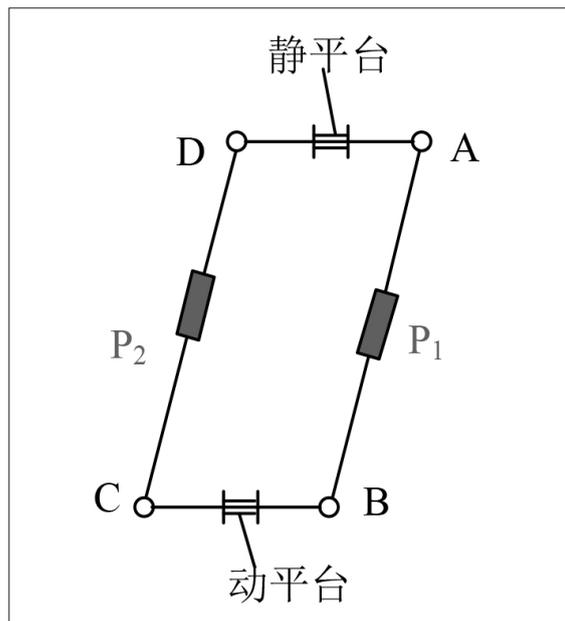


图 1 并联机器人支链概念图

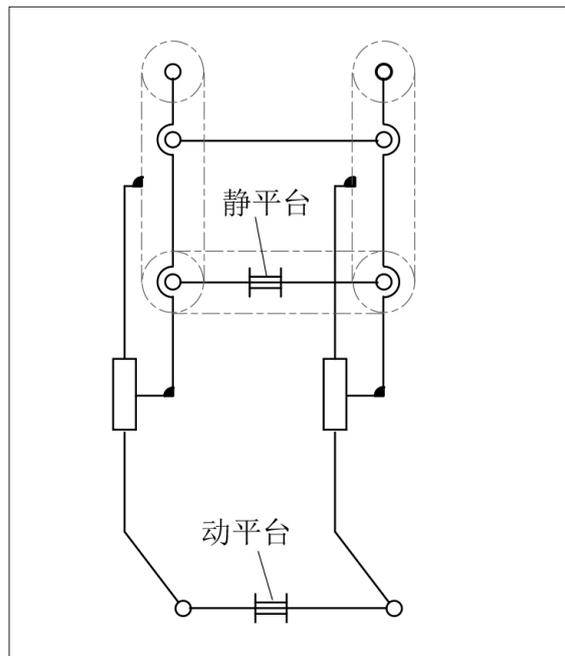


图 2 支链机构原理简图

动副 P_1 和 P_2 ，同步移动副 P_1 和 P_2 由同步带传动和固定在同步带上的滑块连杆构成， P_1 和 P_2 的伸缩量由同一台电机驱动通过同步带传动并保持同步伸缩，动平台与 4R 机构的 BC 杆构成转动副 (R)。图 3 为支链机构 CAD 模型。

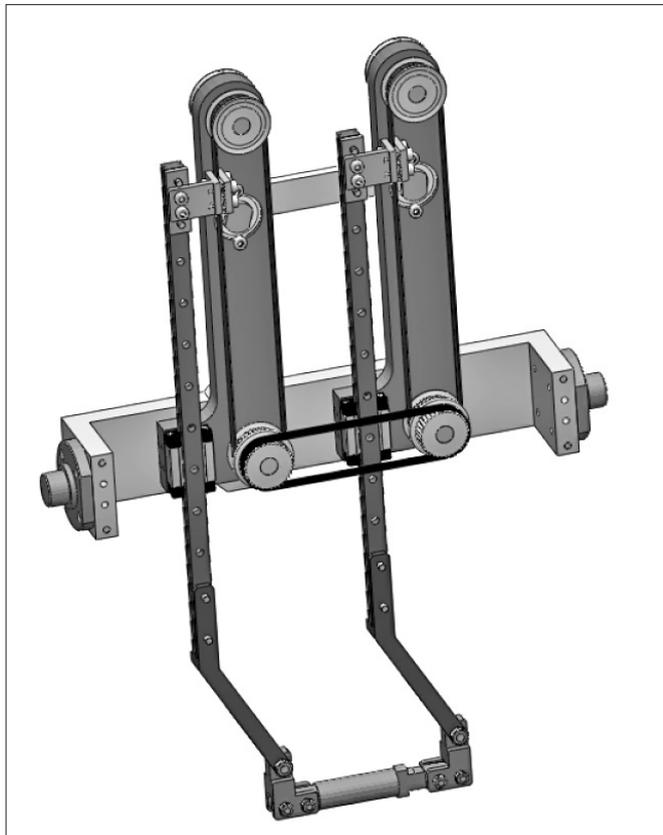


图 3 支链机构 CAD 模型

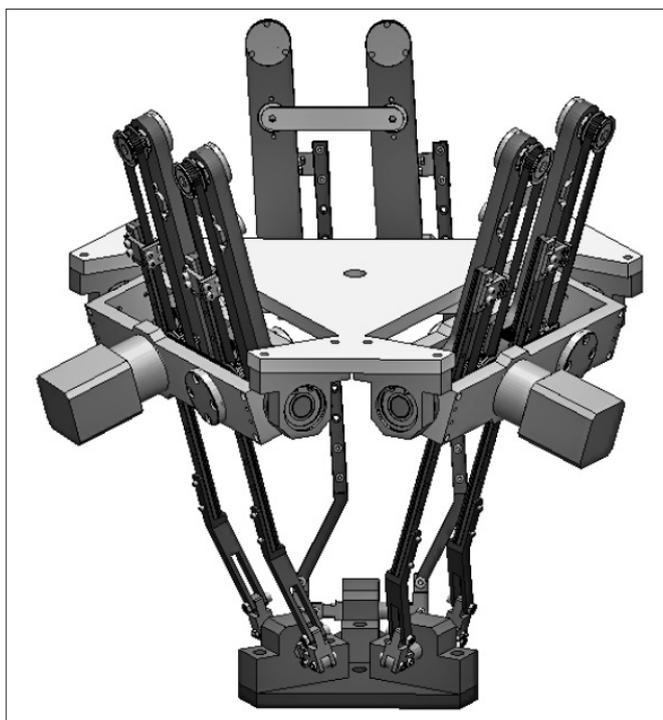


图 4 新型并联机器人模型

采用 3 条支链采用空间全对称布局方式可以使新型并联机器人拥有更好的性能，图 4 为新型三平移并联机器人模型。

2 新型三平移并联机器人的运动学逆解

该机构的位置逆解问题可以描述为：已知机构尺度参数，求解动平台姿态和各支链杆长的问题。并联机器人的位置逆解一般有矢量法、解析法等，由于本机构为三平移机构，没有旋转姿态，因此采用解析法较适宜。本新型三平移并联机器人采用解析法进行运动学逆解，并可分为两步进行。(1) 计算支链长度；(2) 计算驱动副 P 伸缩长度。

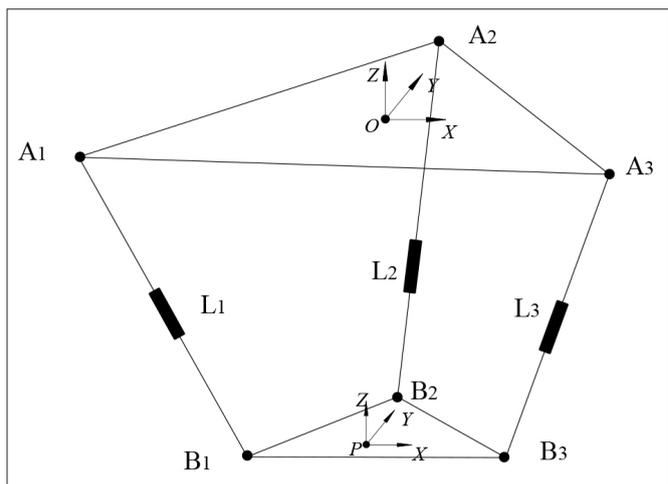


图 5 三平移机构简化图

2.1 计算支链长度

为了便于分析计算将新型并联三平移机构可简化为图 5。设 O 点为静平台结构中心，P 点为动平台结构中心。 A_i ($i=1,2,3$) 分别为支链两个铰链中心。 B_i ($i=1,2,3$) 为支链与动平台连接的铰链中心，在静平台 O 点建立直角坐标系 O-XYZ 坐标系 (以 A_1 、 A_3 连线为 x 轴，垂直于 A_1 、 A_2 、 A_3 平面为 z 轴)，在动平台 P 点建立直角坐标系 P-XYZ 坐标系 (以 B_1 、 B_3 连线为 x 轴，垂直于 B_1 、 B_2 、 B_3 平面为 z 轴)，P 点在 O-XYZ 中的坐标为 $P(x, y, z)$ 。由于机构为三平移机构因此 B_i 点在 P-XYZ 坐标系中位置固定不变，因此机构的逆解就转变为求 B_i 点与支链杆长 L_i ($i=1,2,3$) 的关系。

以 A_i 点及 B_i 点的初始坐标分别为 A_i (A_{ix}, A_{iy}, A_{iz})、 B_i (B_{ix}, B_{iy}, B_{iz})，以 L_i ($i=1,2,3$) 表示支链的伸缩长度，则其位置方程为：

$$L_i = \sqrt{(A_{ix} - B_{ix} - \Delta x)^2 + (A_{iy} - B_{iy} - \Delta y)^2 + (A_{iz} - B_{iz} - \Delta z)^2}$$

式中： L_i ：支链的伸缩长度 ($i=1,2,3$)； Δx ：动平台在 X 方向上的位置变化量； Δy ：动平台在 X 方向上的位置变化量； Δz ：动平台在 Z 方向上的位置变化量。

2.2 计算 P 副伸缩长度

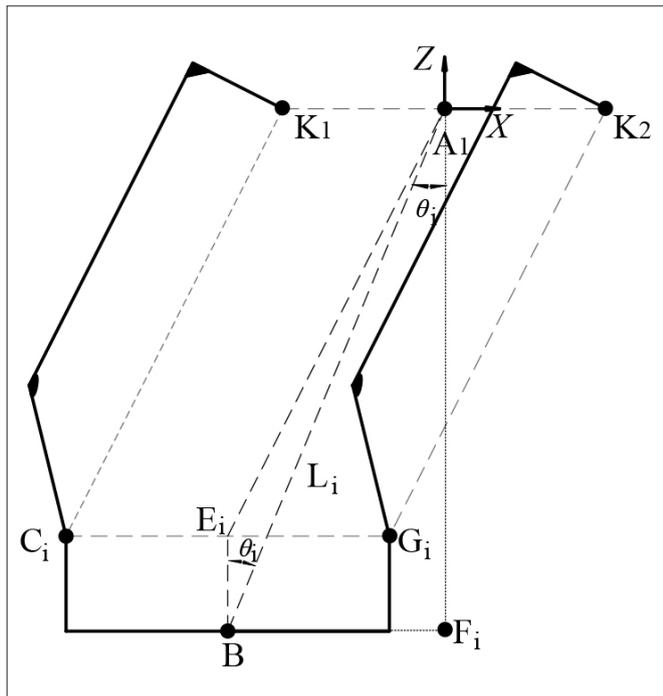


图6 支链参数计算图

图6为三平移机构的一条支链的结构简图,其中 A_i 点为两摆臂的中点, B_i 点为动平台铰链中心, K_1 、 K_2 点分别为两摆臂的中心, C_i 、 G_i 点为铰链的中心, E_i 点为 C_iG_i 的中点, $K_{1i}C_i$ 与 $K_{2i}G_i$ 相等且为导轨的伸缩长度 L_{id} ,由图可知 K_1C 与 AE 相等。上一步已经求出 A_iB_i 的长度 L_i ,由于 B_i 点与 E_i 点存在偏移长度 B_iE_i ,故 A_iB_i 不等于 A_iE_i 。 A_iB_i 与 B_iE_i 间夹角为 θ ,则 $\tan \theta = B_iF_i / A_iF_i$ 。其中 A_iF_i 为 B_i 点的 Z 坐标值。 B_iF_i 为 B_i 点相对于 A_i 点在支链摆动方向上的偏移量。

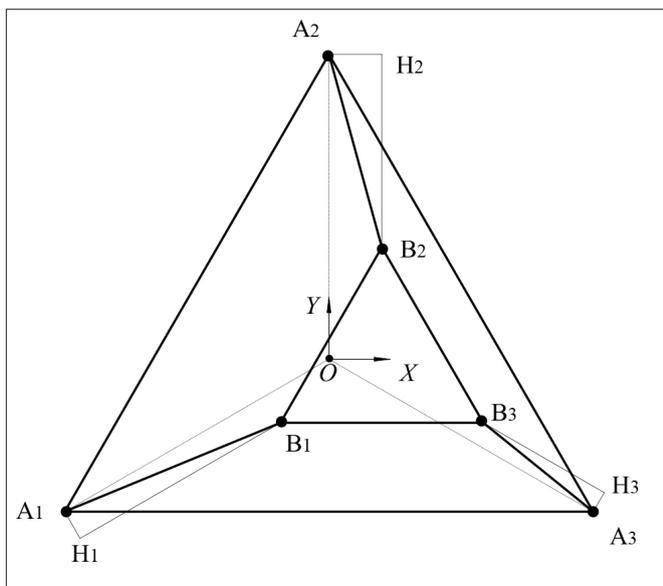


图7 三平移机构简图的俯视图

图7为三平移机构简图的俯视图,其中方向 A_iH_i 为支链的摆动方向,且垂直 OA_i 。过 B_i 点作直线 B_iH_i 与 OA_i

平行,故 A_i 点到直线 B_iH_i 的垂直距离 A_iH_i 即为图6中的 B_iF_i 。三条直线 OA_i 的直线方程分别为:

$$\begin{cases} x - \sqrt{3}y = 0 \\ x = 0 \\ x + \sqrt{3}y = 0 \end{cases}$$

过 B_i 点平行于 OA_i 的直线 B_iH_i 的方程分别为:

$$\begin{cases} x - \sqrt{3}y - B_{ix} - \Delta x + \sqrt{3}(B_{iy} + \Delta y) = 0 \\ x - B_{ix} - \Delta x = 0 \\ x + \sqrt{3}y - B_{ix} - \Delta x - \sqrt{3}(B_{iy} + \Delta y) = 0 \end{cases}$$

则过 A_i 点垂直于 B_iH_i 的垂线 A_iH_i 的长度为:

$$A_iH_1 = |A_{ix} - \sqrt{3}A_{iy} - B_{ix} - \Delta x + \sqrt{3}(B_{iy} + \Delta y)| / 2$$

$$A_iH_2 = |A_{ix} - B_{ix} - \Delta x| / 2$$

$$A_iH_3 = |A_{ix} + \sqrt{3}A_{iy} - B_{ix} - \Delta x + \sqrt{3}(B_{iy} + \Delta y)| / 2$$

由于 B 点的 z 坐标相同,故 $\theta_i = \tan^{-1}(A_iH_i / |B_{iz} + \Delta z|)$

可得其位置逆解方程组为 $L_{id} = \sqrt{L_i^2 + B_iE_i^2 - 2L_i * B_iE_i * \cos \theta_i}$

3 实例验算

为了验证上述所得新型三平移并联机器人位置逆解方程的正确性,以及所得结果的精确程度,现通过数值算例进行计算分析。

3.1 基于 MATLAB 的位置逆解数例

先规划一条以动平台中心 P 点的运动轨迹,其运动形式为等半径等距螺旋曲线,如8所示。以动平台的中心在坐标系 $O-XYZ$ 的坐标 $(0, 0, -205)$ 为圆心,半径为 100mm ,升程为 48mm 的螺旋线,初始位置中心坐标为 $(100, 0, -205)$,顺时针旋转,终止位置坐标为 $(100, 0, -157)$ 。设定 P 点运动总时长为 8s ,步长为 0.04s ,共 200 步。

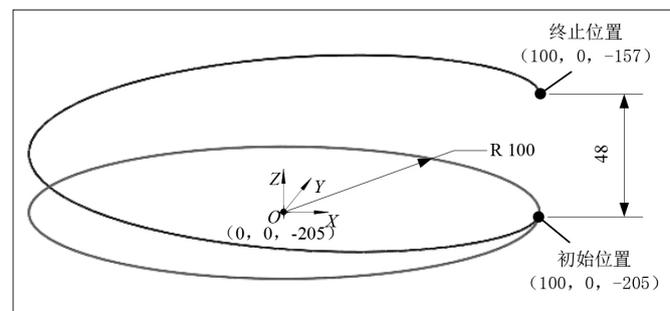


图8 P点运动轨迹曲线图

在 MATLAB 中编写并联机器人逆解方程程序,输入三平移并联机器人的结构参数,给出一组运动平台中心 P 的位置坐标,将数据代入反解程序中,计算得到各个支链驱动副 P 的位移曲线如9所示。

3.2 运动仿真验证

在 Solidworks 软件中建立虚拟样机,并在动平台 P 点加载上文相同的运动轨迹,在每个支链上设置位移传感器,用于监测每个支链的位移随时间变化量。在 Solidworks

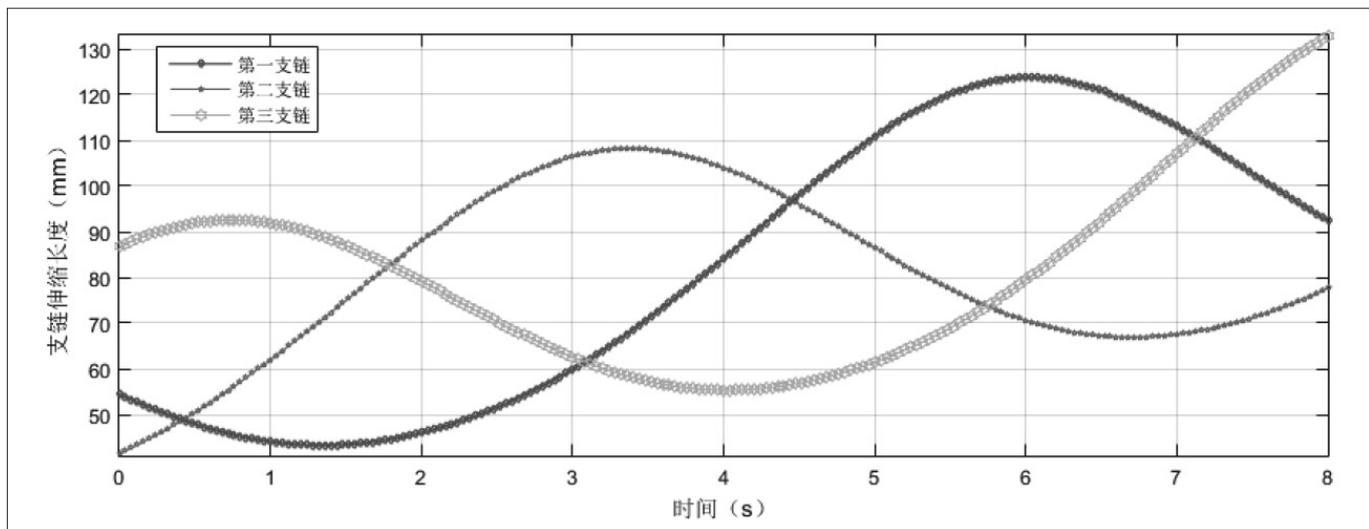


图9 MATLAB 计算位移曲线图

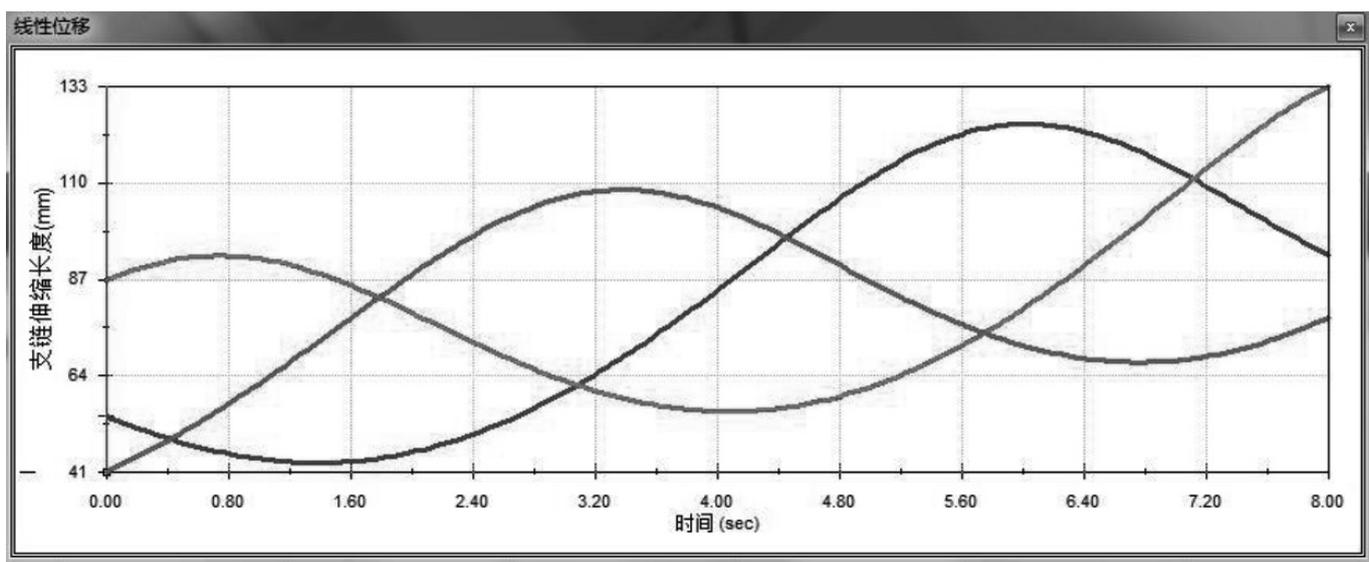


图10 SolidWorks 仿真位移曲线图

Motion 模块中运行运动仿真, 并仿真结果中提取出每个支链的位移传感器数据, 得到每个支链的时间位移关系图, 如下图10所示:

对同一条P点预定轨迹分别采用MATLAB逆解计算和SolidWorks虚拟样机运动仿真, 从两者的结果可以得出新型并联机器人每个支链时间位移关系是一致的, 验证了文中所求逆解的正确性。

通过上述实例仿真分析验证了该设计的新型三平移并联机器人虚拟样机可行, 并制造了物理样机如图所示11。

4 结语

本文运用虚链机构法和构型综合分析提出了一种新型三平移并联机器人。新型三平移并联机构由空间全对称分布的基于同步带驱动的3条支链构成。通过对解析法并分析了该机构的位置逆解方程, 运用MATLAB和SolidWorks对新型并联机器人进行运动仿真, 并验证了运

动力学逆解方程的正确性, 后续将会进一步进行试验和优化。

基金项目: 江西省重点研发计划资助项目(20192BBE50084, 20192BBE50005); 江西省教育厅科学技术研究项目重点项目(GJJ181340, GJJ191421)。

参考文献:

- [1] 刘辛军, 汪劲松, 李剑锋, 等. 一种新型空间3自由度并联机构的正反解及工作空间分析[J]. 机械工程学报, 2001, 37(10): 36-39.
- [2] REY L, CLAVEL R. The Delta Parallel Robot[M]. Parallel Kinematic Machines. London, UK: Springer, 1999.
- [3] STOCK M, MILLER K. Optimal Kinematic Design of Spatial Parallel Manipulators: Application to Linear Delta Robot[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2): 292-301.
- [4] BOURI M, CLAVEL R. The Linear Delta: Developments

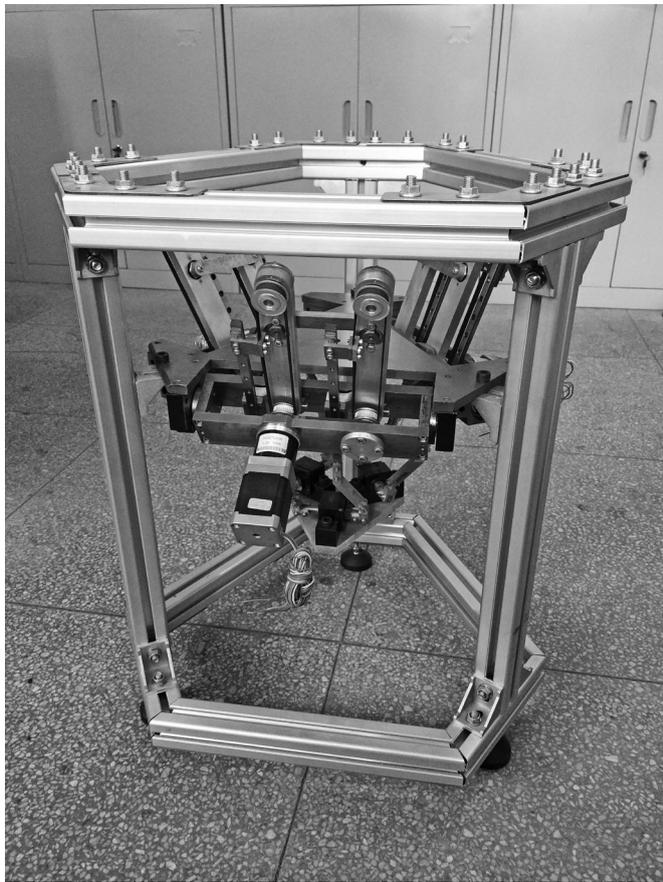


图 11 新型三平移并联机器人样机

and Applications[C]//2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics. Munich,2010:978-3-8007-3273-9.

[5] KELAI A I A R, COMPANY O, ZAATRI A. Multiobjective Optimization of a Linear Delta Parallel Robot[J]. Mechanism & Machine Theory, 2012, 50(2): 159-178.

[6] TSAI L W, WALSH G C, STAMPER R E. Kinematics of a Novel Three DOF Translational Platform[J]. 1996, 4(4): 3446-3451.

[7] 李仕华, 黄真. 一种特殊 3-UPU 并联平台机构瞬时运动特性[J]. 中国机械工程, 2005, 16(18): 1641-1646.

[8] LI S, HUANG Z, ZUO R. Kinematics of a Special 3-DOF 3-UPU Parallel Manipulator[C]//ASME 2002 International

Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, 2002: 1035-1040.

[9] 赵铁石, 黄真. 一种三维移动并联平台机构的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2001, 12(6): 612-616.

[10] 尹小琴, 马履中. 三平移并联机构 3-RRC 的工作空间分析[J]. 中国机械工程, 2003, 14(18): 1531-1533.

[11] ZHAO Y. Dimensional Synthesis of a Three Translational Degrees of Freedom Parallel Robot while Considering Kinematic Anisotropic Property[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 169-179.

[12] ZENG Qiang, EHMANN K, CAO Jian. Tri-pyramid Robot: Design and Kinematic Analysis of a 3-DOF Translational Parallel Manipulator[J]. Robotics & Computer-integrated Manufacturing, 2014, 30(6): 648-657.

[13] LEE S, ZENG Q, EHMANN K F. Error Modeling for Sensitivity Analysis and Calibration of the Tri-pyramid Parallel Robot[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(5): 1-14.

[14] 沈惠平, 吴成琦, 许可, 赵迎春, 杨廷力. 一种零耦合度三平移并联机构的设计及运动学[J]. 中国机械工程, 2019, 30(06): 658-664+671.

[15] 梅江平. Diamond 高速并联机械手[J]. 天津科技, 2007(04): 23-25.

[16] Kong X, Gosselin C M. Type synthesis of three-dof up-equivalent parallel manipulators using a virtual-chain approach. In: Advances in Robot Kinematics. Netherlands: Springer, 2006. 123-132.

[17] 杨廷力, 金琼, 刘安心, 沈惠平, 罗玉峰. 基于单开链单元的三平移并联机器人机构型综合及其分类[J]. 机械工程学报, 2002(08).

[18] 于靖军, 赵铁石, 毕树生, 宗光华, 黄真. 三维平动并联机构型综合研究[J]. 自然科学进展, 2003(08): 61-68.

[19] 汪满新, 黄田. 面对称 3-SPR 并联机构的运动学分析与尺度综合[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 22-27.

作者简介: 占晓煌 (1985-), 男, 江西九江人, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 精密驱动和机构设计。