

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.002

3支链6自由度并联机构运动学研究

张强强, 许勇*, 赵传森, 王艳, 董飞

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了使并联机构在三维空间完成3个转动和3个移动的动作,可以进行全方位的运动,课题组提出了6自由度2PPRS-RPRS并联机构。课题组描述了该并联机构的构型,建立了机构的运动坐标系;利用螺旋理论求解了机构自由度,并运用修正Kutzbach-Grüble公式验证了自由度求解的正确性;根据支链与定、动平台间的相对姿态关系,推导了支链平面方程,并结合杆长不变条件,推导获得了该6自由度并联机构全部位置逆解的解析解;并基于三维边界搜索法,求解绘制出了机构的可达位置工作空间;最后,通过SolidWorks/Simmechanics的三维运动/参数可视化联合仿真,得到了机构的驱动位移相对时间的变化曲线。研究结果表明该机构构型设计、自由度分析正确,得出了该机构在三维空间内的运动学输入、输出的变化规律。

关键词:并联机构;螺旋理论;自由度;位置逆解;工作空间

中图分类号:TP242.2;TH112 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)03-0008-07

Kinematics Study of Six DOF Parallel Mechanism with Three Branches

ZHANG Qiangqiang, XU Yong*, ZHAO Chuansen, WANG Yan, DONG Fei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to enable the parallel mechanism to complete three rotations and three movements in three-dimensional space and carry out all-round motion, a 6-DOF 2PPRS-RPRS parallel mechanism was proposed by the research group. Firstly, the configuration of the parallel mechanism was described and the kinematic coordinate system of the mechanism was established; the degree of freedom of the mechanism was solved by the spiral theory, and the correctness of the solution was verified by the modified Kutzbach-Grüble formula. According to the relative attitude relation between the branch-chain and the fixed and moving platform, the plane equation of the branch-chain was deduced, and the analytical solution of all the inverse solutions of the 6-DOF parallel mechanism was obtained by combining the condition of the bar length invariability. Furthermore, based on the three-dimensional boundary search method, the reachable position workspace of the mechanism was solved and mapped. Finally, through SolidWorks/Simmechanics 3D movement/parameter visualization joint simulation, the change curve of driving displacement relative to time was obtained. The research results show that the structure design and DOF analysis of the mechanism are correct, and the kinematic input and output change rules of the mechanism in three-dimensional space are obtained.

Keywords: parallel mechanism; spiral theory; degree of freedom; inverse position solution; workspace

并联机构相对于串联机构具有空间姿态灵活多样、运动学解析逆解易于获得、刚度/强度大和位置精度高等优点^[1]。1965年Stewart平台^[2]的提出引起了众多学者对并联机构的关注。1978年Hunt^[3]将6自

由度的Stewart机构运用到到工业机器人手臂上。Stewart平台一般采用6-SPS构型方案,它有4个变形构型:6-SPS,6-RSS^[4],6-PSS^[5]及正交式布局的6自由度机构^[6]等;4个变形机构动定平台之间均具有6根

收稿日期:2019-07-26;修回日期:2020-01-16

第一作者简介:张强强(1993),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要研究方向为机器人机构学。通信作者:许勇(1974),男,江苏南通人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机器人机构学。E-mail:bruceyong@163.com

支链,共同决定着动平台的位姿,且具有6个自由度。但是由于支链数较多,干涉也就相对较多,且其运动过程中会发生耦合现象,致使其工作空间比较小,并且在工作空间边界附近机构可控性变差。因此课题组提出了3支链2PPRS-RPRS并联机构,机构具有6个自由度,相对于Stewart机构干涉较少,耦合现象减少,工作空间更大。

1950年,Behi^[7]提出一种6自由度的3-PRPS并联机构,Alizade等^[8]改进了Behi提出的3-PRPS并联机构,改进后的机构具有3支链且其运动轨道为环形的,机构的定平台铰点可在圆周轨道上运动,这种构型的机构比直线运动副作为驱动副的6-SPS构型并联机器人具有更高的运动灵活度。Lim等^[9]提出了模块化的3支链6自由度并联机构。1997年,意大利学者Massimo等^[10]提出了具有6自由度的TURIN并联机器人;1998年Ronen Ben-Horin等^[11]设计了有较大工作空间且够输出6个自由度的并联机器人,该机构通过驱动3根运动过程中杆长不发生变化的连杆,来实现动平台6自由度的变换。Gosselin等^[12-13]提出了3支链且每根支链采用平面四杆机构的6自由度并联机构机器人,该机构驱动全部安装在固定平台上,促使动平台运动起来灵活稳定。Angles等^[14]和Yang等^[15]制造出了3-RRRS的3支链6自由度并联机床,还制造了6自由度3-RPRS并联机床。哈尔滨工业大学研制出了Delta机构与3-RRR球面机构混联的6自由度操作手^[16],此机构末端操作器实现了平动与转动的运动解耦。

课题组以6自由度2PPRS-RPRS并联机构为研究对象,基于杆长不变的条件与平面方程约束的方法求得了位置逆解解析解,利用三维边界搜索法以及MATLAB编程求出机构的可达位置工作空间,运用Simmechanic与SolidWorks进行了逆运动学联合仿真。课题组的研究成果进一步丰富了6自由度构型设计及运动学分析研究。

1 机构描述与坐标系的建立

课题组提出的2PPRS-RPRS并联机构,由动平台、定平台、2条PPRS(移动副-移动副-转动副-球面副)支链、1条RPRS(转动副-移动副-转动副-球面副)支链和1条RPRS(转动副-移动副-转动副-球面副)支链组成,如图1所示。图中 B_1, B_2 是支链1和支链2第1个移动副的形心, B_3 是支链3与定平台相连的转动副的形心; P_1, P_2, P_3 表示各支链第2个移动副的形心; D_1, D_2, D_3 为各支链中转动副的形心; C_1, C_2, C_3 是动平台

与各个支链相连的球面副的形心。

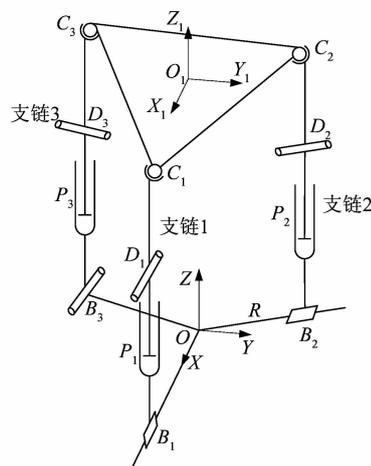


图1 2PPRS-RPRS并联机构

Figure 1 2PPRS-RPRS parallel mechanism

该并联机构的定平台由3个夹角互为 120° ,且相交于一点的固定支架构成,动平台 $C_1C_2C_3$ 是一个外接圆半径为 r 的等边三角形,定平台与支链1和支链2由移动副 B_1, B_2 连接,支链3与定平台由转动副 B_3 连接,动平台与连杆 C_iD_i 通过球面副 C_i ($i=1,2,3$)相连,该机构还有转动副 D_i ($i=1,2,3$)和移动副 P_i ($i=1,2,3$)。以初始位形时并联机构定平台上 $B_1B_2B_3$ 的形心 O 为原点建立定坐标系 $O-XYZ$,其中 X 轴正方向由 O 指向移动副形心 B_1 , Z 轴正方向垂直于定平台向上;以正三角形 $C_1C_2C_3$ 形心 O_1 为原点建立动坐标系 $O-X_1Y_1Z_1$, X_1 轴方向由 O_1 指向 C_1 , Z_1 轴方向竖直向上, Y, Y_1 的方向根据右手螺旋法则确定。

支链1的移动驱动副 B_1 的方向沿 X 轴方向、支链2的移动驱动副 B_2 方向沿 OB_2 ,支链3的转动驱动副 B_3 轴线方向垂直于 OB_3 ,各支链第2个移动驱动副 P_i ($i=1,2,3$)的方向垂直于各支链第1个驱动副的方向,支链1和支链2的转动副 D_i ($i=1,2$)的回转轴平行于第1个驱动副 B_i ($i=1,2$)的方向,支链3的转动副 D_3 回转轴垂直于转动副 B_3 的轴线。

2 自由度分析

课题组首先运用螺旋理论对2PPRS-RPRS并联机构进行自由度分析,然后利用修正的Kutzbach-Grübler公式^[17]验证机构自由度。

2.1 螺旋理论计算自由度

2PPRS-RPRS并联机构在初始位形下,支链1的旋量示意图如图2(a)所示。

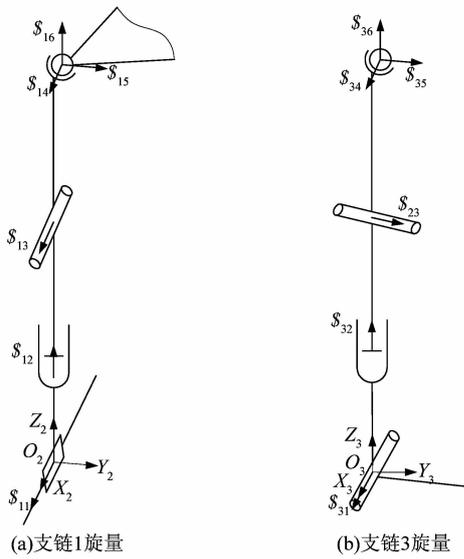


图2 支链结构简图

Figure 2 Schematic diagram of branch chain structure

支链1的运动螺旋系为:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{11}: & (0 \ 0 \ 0; p_{11} \ 0 \ 0); \\ \mathcal{S}_{12}: & (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ r_{12}); \\ \mathcal{S}_{13}: & (1 \ 0 \ 0; 0 \ q_{13} \ 0); \\ \mathcal{S}_{14}: & (1 \ 0 \ 0; 0 \ q_{14} \ 0); \\ \mathcal{S}_{15}: & (0 \ 1 \ 0; p_{15} \ 0 \ 0); \\ \mathcal{S}_{16}: & (0 \ 0 \ 1; 0 \ q_{16} \ 0). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $p_{ij}, q_{ij}, r_{ij} (i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 为各个运动副中心到各自坐标系原点的线矩; \mathcal{S}_{ij} 表示并联机构第 i 个支链的第 j 个运动副对应的运动螺旋。

设支链1的运动螺旋与约束螺旋分别为: $\mathcal{S}_1 = (L_1 \ M_1 \ N_1; P_1 \ Q_1 \ R_1)$ 和 $\mathcal{S}_1^r = (L_1^r \ M_1^r \ N_1^r; P_1^r \ Q_1^r \ R_1^r)$, 则有:

$$L_1 P_1^r + M_1 Q_1^r + N_1 R_1^r + P_1 L_1^r + Q_1 M_1^r + R_1 N_1^r = 0. \quad (2)$$

式中: L_1, M_1, N_1 表示运动螺旋 \mathcal{S}_1 的方向数; P_1, Q_1, R_1 表示 \mathcal{S}_1 对原点的线距在 X, Y, Z 轴的分量。同理 L_1^r, M_1^r, N_1^r 表示运动反螺旋 \mathcal{S}_1^r 的方向数, P_1^r, Q_1^r, R_1^r 表示 \mathcal{S}_1^r 对原点的线距在 X, Y, Z 轴的分量。

将式(1)代入式(2)得: $L_1^r = M_1^r = N_1^r = P_1^r = Q_1^r = R_1^r = 0$, 即支链1的约束螺旋 \mathcal{S}^r 为零。同理可得, 支链2的约束螺旋 \mathcal{S}^r 也为零。

支链3的机构简图, 如图2(b)所示, 其运动螺旋

$${}^0_{O_1} \mathbf{R} = \text{Rot}(Z, \varphi) \text{Rot}(Y, \theta) \text{Rot}(X, \Psi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \theta & \cos \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \Psi - \sin \varphi \cdot \cos \Psi & \cos \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \Psi + \sin \varphi \cdot \sin \Psi \\ \sin \varphi \cdot \cos \theta & \sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \Psi + \sin \varphi \cdot \cos \Psi & \sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \Psi - \cos \varphi \cdot \sin \Psi \\ -\sin \varphi & \cos \theta \cdot \sin \Psi & \cos \theta \cdot \cos \Psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

系为:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_{31}: & (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ r_{31}); \\ \mathcal{S}_{32}: & (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ r_{32}); \\ \mathcal{S}_{33}: & (1 \ 0 \ 0; 0 \ q_{33} \ 0); \\ \mathcal{S}_{34}: & (1 \ 0 \ 0; 0 \ q_{34} \ 0); \\ \mathcal{S}_{35}: & (0 \ 1 \ 0; p_{35} \ 0 \ 0); \\ \mathcal{S}_{36}: & (0 \ 0 \ 1; 0 \ q_{36} \ 0). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

所以支链3的约束螺旋 \mathcal{S}^r 为零。

因为支链1、支链2和支链3的约束螺旋都为零, 所以整个机构的自由度为6, 即2PPRS-RPRS 并联机构可以实现空间中的3个转动和3个移动。

2.2 Kutzbach-Grübler 公式验证自由度

运用修正的 Kutzbach-Grübler 公式再次计算该并联机构自由度:

$$F = 6(N - g - 1) + \sum_{j=1}^g f_j + v - \xi. \quad (4)$$

式中: F 是机构的自由度; N 是包括机架的构件数; g 是运动副数目; f_j 是第 j 个运动副的自由度; v 是冗约束数目; ξ 是局部自由度。

2PPRS-RPRS 并联机构总的构件数 $N = 11$, 共有运动副数 $g = 12$, 冗余约束和局部自由度为零, 其中转动副和移动副各有1个自由度, 球面副具有3个自由度, 因此所有运动副的自由度总和为 $\sum_{j=1}^g f_j = 18$ 。

将以上参数代入公式(4)得出2PPRS-RPRS 并联机构的自由度: $F = 6 \times (11 - 12 - 1) + 18 = 6$, 与螺旋理论计算结果相符, 验证了螺旋理论计算自由度的正确性。

3 位置逆解建模

3.1 动和定平台各铰链形心位置矢量求解

2PPRS-RPRS 并联机构的位置逆解定义为: 已知动平台的位姿 $(X_{O_1}, Y_{O_1}, Z_{O_1}, \varphi, \theta, \Psi)$, 求解移动驱动副 $P_i (i=1, 2, 3)$ 的线位移 $s_i (i=1, 2, 3)$ 、移动驱动副 $B_i (i=1, 2)$ 的线位移 $w_i (i=1, 2)$ 和转动驱动副 B_3 的角位移 β 。其中 φ, θ, Ψ 是动平台相对于 X_1, Y_1, Z_1 的夹角。

采用 Z - Y - X 固定角坐标系的方法: 首先将动坐标系 O_1 - $X_1 Y_1 Z_1$, 与定坐标系 O - XYZ 重合, 然后动坐标系先绕着 X 轴旋转 Ψ , 再绕 Y 轴旋转 θ , 最后绕 Z 轴旋转 φ 。从而可以得出:

$X_1O_1Y_1$ 平面在动平台 $C_1C_2C_3$ 平面上, X_1 轴通过球面副 S_1 。因为动平台的外切圆半径为 r , 所以球面副 $C_i (i = 1, 2, 3)$ 在动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中的坐标为: ${}^{0_1}C_1: (r, 0, 0), {}^{0_1}C_2: (-\frac{r}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}r, 0), {}^{0_1}C_3: (-\frac{r}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}r, 0)$, 则球面副 $C_i (i = 1, 2, 3)$ 在定坐标系中的矢量为:

$${}^0C_i = {}^0_{0_1}R \cdot {}^{0_1}C_i + {}^0O_1 \quad (6)$$

由式(5)和(6)可得 C_1, C_2, C_3 在定坐标系 $O-XYZ$ 的坐标为:

$$\left. \begin{aligned} {}^0C_1: & (x+a_1r, y+a_2r, z+a_3r); \\ {}^0C_2: & (x-\frac{1}{2}a_1r+\frac{\sqrt{3}}{2}b_1r, y-\frac{1}{2}a_2r+\frac{\sqrt{3}}{2}b_2r, z-\frac{1}{2}a_3r+\frac{\sqrt{3}}{2}b_3r); \\ {}^0C_3: & (x-\frac{1}{2}a_1r-\frac{\sqrt{3}}{2}b_1r, y-\frac{1}{2}a_2r-\frac{\sqrt{3}}{2}b_2r, z-\frac{1}{2}a_3r-\frac{\sqrt{3}}{2}b_3r) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

如图3所示, 因为 B_1D_1 和 B_2D_2 始终与 $OB_i (i = 1, 2)$ 垂直, 支链3通过转动副 B_3 和定平台相连, 所以各个支链所在平面方程为:

$$\left. \begin{aligned} \text{面 } B_1D_1C_1: & X = w_1; \\ \text{面 } B_2D_2C_2: & Y = \sqrt{3}X + \frac{2\sqrt{3}}{3}w_2; \\ \text{面 } B_3D_3C_3: & Y = \frac{\sqrt{3}\cot\beta}{2}Z - \frac{\sqrt{3}}{2}R_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $w_i (i = 1, 2)$ 表示支链1, 2中第1个驱动副 B_1, B_2 的线位移; β 表示支链3转动驱动副 B_3 的角位移; R 为定平台上 OB_i 的长度; r 为动平台的外接圆半径。

因为支链1与支链2所在的平面 $B_1D_1C_1$ 和 $B_2D_2C_2$ 与定平台所在平面垂直, 支链3所在平面 $B_3D_3C_3$ 与定平台所在平面夹角为 β , 所以3条支链满足以下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} B_1D_1 \cdot OB_1 &= 0; \\ B_2D_2 \cdot OB_2 &= 0; \\ B_3D_3 \cdot B_3O &= |B_3D_3| \times |B_3O| \times \cos\beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} m^2 &= (R-w_1-a_1r-X_{0_1})^2 + (-a_2r-Y_{0_1})^2 + (s_1-a_3r-Z_{0_1})^2; \\ m^2 &= \left[-\frac{1}{2}(R-w_1) + \frac{1}{2}a_1r - \frac{\sqrt{3}}{2}b_1r - X_{0_1} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(R-w_2) + \frac{1}{2}a_2r - \frac{\sqrt{3}}{2}b_2r - Y_{0_1} \right]^2 + \left(s_2 + \frac{1}{2}a_3r - \frac{\sqrt{3}}{2}b_3r - Z_{0_1} \right)^2; \\ m^2 &= \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}(R-s_3)\cos\beta + \frac{1}{2}a_1r + \frac{\sqrt{3}}{2}b_1r - X_{0_1} \right]^2 + \left[-\frac{1}{2}(R-s_3)\cos\beta + \frac{1}{2}a_2r + \frac{\sqrt{3}}{2}b_2r - Y_{0_1} \right]^2 + \left(s_3\sin\beta + \frac{1}{2}a_3r + \frac{\sqrt{3}}{2}b_3r - Z_{0_1} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

根据式(6)、式(8)和式(9), 可以求得各个支链第1个驱动位移 $w_i (i = 1, 2)$ 和转角 β 的解析解分别为:

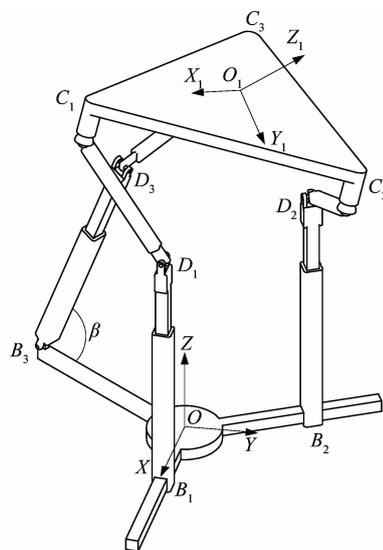


图3 机构一般位形示意图

Figure 3 Schematic diagram of general configuration of mechanism

在定坐标系 $O-XYZ$ 中, 移动副 B_1, B_2 以及转动副形心 B_3 的坐标为:

$$\left. \begin{aligned} {}^0B_1 &= (R-w_1, 0, 0); \\ {}^0B_2 &= \left(-\frac{1}{2}(R-w_2), \frac{\sqrt{3}}{2}(R-w_2), 0 \right); \\ {}^0B_3 &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}R, -\frac{1}{2}R, 0 \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3.2 位置逆解解析解

各个支链上的 C_i 和 D_i 之间的距离 (即各个支链第2个移动驱动副位移) 为 $S_i (i = 1, 2, 3)$, 且 D_i 在定坐标系 $O-XYZ$ 中坐标为:

$$\left. \begin{aligned} {}^0D_1 &= (R-w_1, 0, s_1); \\ {}^0D_2 &= \left(-\frac{1}{2}(R-w_2), \frac{\sqrt{3}}{2}(R-w_2), s_2 \right); \\ {}^0D_3 &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}(R-s_3\cos\beta), -\frac{1}{2}(R-s_3\cos\beta), s_3\sin\beta \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据 C_i 和 D_i 的坐标, 可以求出 C_i 和 D_i 之间的距离 $m = {}^0D_i - {}^0C_i$, 所以有:

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= a_2 r + Y_{01}; \\ w_2 &= \frac{\sqrt{3}}{3} a_1 r + \frac{1}{2} a_2 r - \frac{2}{3} b_1 r - \frac{\sqrt{3}}{3} o_2 r - \frac{\sqrt{3}}{4} X_{01} - \frac{1}{2} Y_{01}; \\ \beta &= -\frac{\sqrt{3}}{4} a_1 r + \frac{1}{4} a_2 r - \frac{\sqrt{3}}{3} b_1 r - \frac{\sqrt{3}}{2} X_{01} - \frac{1}{4} Y_{01}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \sqrt{m^2 - (R - w_1 - a_1 r - X_{01})^2 + (a_2 r + Y_{01})^2} + a_3 r + Z_{01}; \\ s_2 &= \sqrt{m^2 - \left[-\frac{1}{2}(R - w_1) + \frac{1}{2} a_1 r - \frac{\sqrt{3}}{2} b_1 r - X_{01} \right]^2 - \left[\frac{\sqrt{3}}{2}(R - w_2) + \frac{1}{2} a_2 r - \frac{\sqrt{3}}{2} b_2 r - Y_{01} \right]^2} - \frac{1}{2} a_3 r + \frac{\sqrt{3}}{2} b_3 r + Z_{01}; \\ s_3 &= \frac{\sqrt{m^2 - \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}(R - s_3) \cos \beta + \frac{1}{2} a_1 r + \frac{\sqrt{3}}{2} b_1 r - X_{01} \right]^2 - \left[-\frac{1}{2}(R - s_3) \cos \beta + \frac{1}{2} a_2 r + \frac{\sqrt{3}}{2} b_2 r - Y_{01} \right]^2} - \frac{1}{2} a_3 r - \frac{\sqrt{3}}{2} b_3 r + Z_{01}}{\sin \beta}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据式(12)和(13)可以求得各个支链第2个驱动位移 s_1, s_2, s_3 的解析解分别为:

式(13)和式(14)求得的所有驱动副输入位移 $w_1, w_2, \beta, s_1, s_2, s_3$, 即为 2PPRS-RPRS 并联机构的位置逆解。

4 工作空间求解

对于 2PPRS-RPRS 并联机构而言, 各个支链的运动位移在一定范围内, 这样才能保证机构的稳定和安全运行。每条支链的运动都有一定的极限位置, $w_{i\min}$ 和 $w_{i\max}$ 分别为第 i 条支链的水平移动副的最小和最大位移, β_{\min} 和 β_{\max} 为支链 3 的转动副 B_3 的转角最小和最大角位移, $s_{i\min}$ 和 $s_{i\max}$ 分别为第 i 条支链上的第 2 个驱动副的最小和最大位移, 则 w_i, s_i, β 应满足如下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} w_{i\min} &\leq w_i \leq w_{i\max}, \quad i = (1, 2); \\ s_{i\min} &\leq s_i \leq s_{i\max}, \quad i = (1, 2, 3); \\ \beta_{\min} &\leq \beta \leq \beta_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

当 w_i, s_i, β 等于极值时, 2PPRS-RPRS 并联机构的运动副达到几何极限位置, 动平台也就达到了可达位置工作空间边界。对于并联机构的位置工作空间求解, 解析法很困难, 特别对于 6 自由度的并联机构。所以, 课题组利用位置逆解的三维数值搜索的方法求解, 具体流程如图 4 所示。

1) 给定 2PPRS-RPRS 并联机构的动平台中心点的初始参数, 即 φ, θ, Ψ 的初始值, 文中设 $\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \Psi = 0^\circ$ 。

2) 给定 x, y, z 的最大范围, 在 x, y, z 的范围内进行搜索, 就是当在 x 方向第 I 次搜索, 在 y 方向第 J 次搜索, 在 z 方向第 K 次搜索时 $x_{\min} < x < x_{\max}, y_{\min} < y < y_{\max}, z_{\min} < z < z_{\max}$ 。

3) 将 $x_i, y_j, z_k, \varphi, \theta, \Psi$ 代入位置逆解, 求此时各个驱动值, 判断是否在允许的范围之内, 若在, 记录此点; 若不在, 继续搜索, 直到完成整个工作空间。

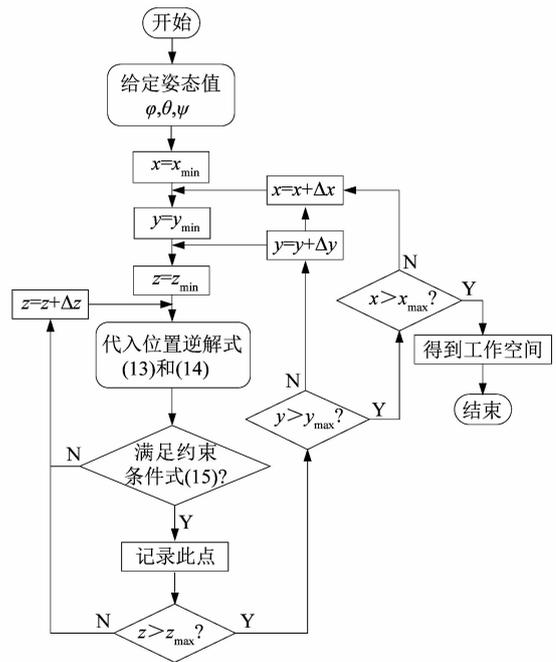


图 4 求解位置工作空间流程

Figure 4 Flow of solving location workspace

4) 绘制 x_i, y_j, z_k 的三维图, 得到机构的位置工作空间。

首先对并联机构的结构参数进行设置, 将 2PPRS-RPRS 并联机器人的机构参数设定如表 1 所示。

表 1 2PPRS-RPRS 并联机构参数设置

Table 1 Parameter settings of 2PPRS-RPRS parallel mechanism

机构自由度	r/mm	R/mm	l/mm	n/mm	m/mm
6	160	180	100	120	120
s_1/mm	s_2/mm	s_3/mm	$\beta/(^\circ)$	w_1/mm	w_2/mm
37.5 ~ 137.5	37.5 ~ 137.5	37.5 ~ 137.5	60 ~ 120	80 ~ 180	80 ~ 180

表1中: r 为动平台外接圆半径; R 为动平台导轨长度; l, n, m 分别为第1,2,3个连杆长度。

通过 MATLAB 以及三维搜索法得到 2PPRS-RPRS 并联机构位置工作空间三视图如图5所示。

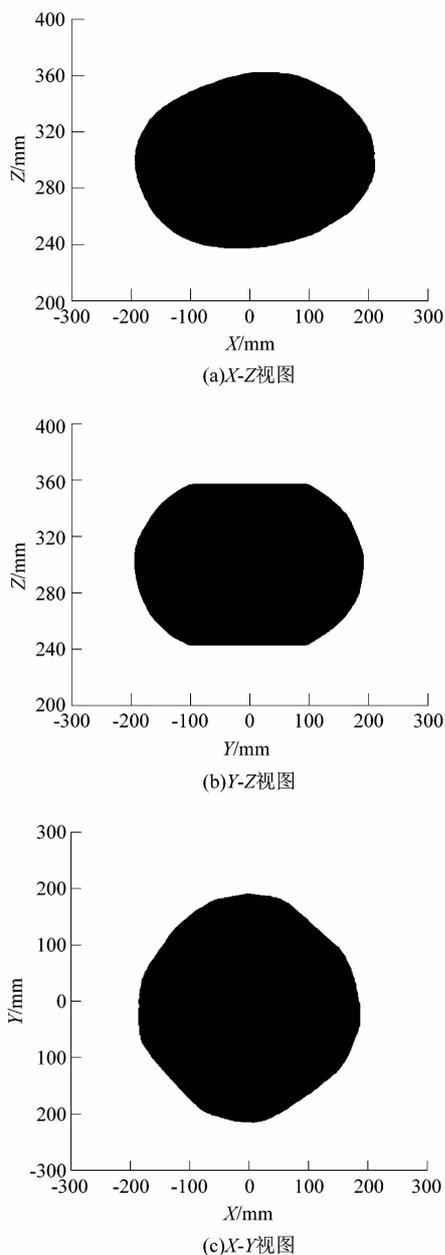


图5 $\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \Psi = 0^\circ$ 时 2PPRS-RPRS 并联机构工作空间

Figure 5 2PPRS-RPRS parallel mechanism workspace at $\varphi = 0^\circ, \theta = 0^\circ, \Psi = 0^\circ$

由 2PPRS-RPRS 并联机器人的工作空间图可知, X-Z 方向视图与 Y-Z 方向视图有一定的差异,原因是机构的不对称性与机构中支链3与定平台之间的转动

副 B_3 的影响; X-Y 方向视图在 Y 方向偏长,原因是转动副 B_3 的轴线方向与 Y 轴的夹角为 30° ,而与 X 轴的夹角为 60° ,因此该机构在 Y 方向的工作空间较大。该机构在 Z 方向的工作范围较小,主要在 240 ~ 360 mm 之间, Z 方向的工作空间主要是由驱动移动副 $P_i (i = 1, 2, 3)$ 的移动距离 s_1, s_2, s_3 决定。总的来说该机构的可达位置工作空间相对 Stewart 机构的工作空间较大,因此 2PPRS-RPRS 并联机构可以满足多方位的位姿调整。

5 构建 Simmechanics 模型和运动仿真

通过 SolidWorks 三维模型转换来构建 Simmechanics 模型,该方法是结合 SolidWorks 三维模型和 Simmechanics Link 接口将 2PPRS-RPRS 并联机器人三维模型转换为 Simmechanics 模型。仿真过程应用前文所设置的机构初始值以及位置逆解。仿真得到动平台中心点 O_1 轨迹如图6所示,运动方向为 $E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow E$,以此验证机构自由度,求出6个驱动的各自位移,如图7所示。

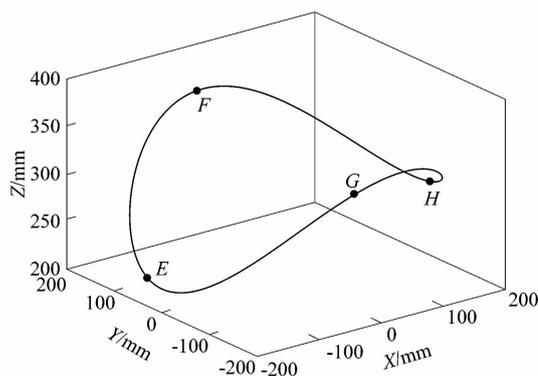
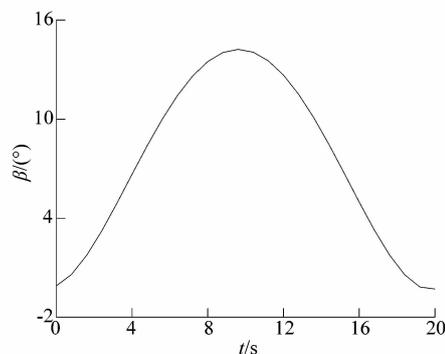


图6 动平台参考点 O_1 设定运动轨迹

Figure 6 Motion trajectory setting at reference point O_1 of moving platform



(a)支链3转动副角位移 β

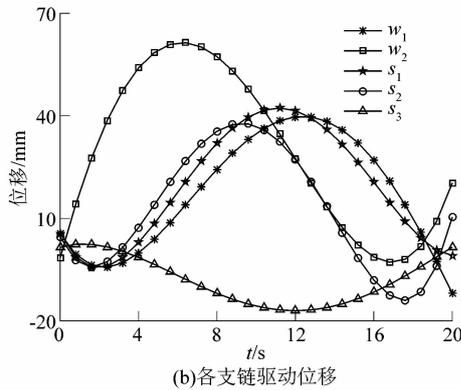


图7 机构转动副角位移 β 和各驱动位移变化曲线
Figure 7 Change curves of rotating pair angle β and driving displacement of mechanism

由图6~7可以看出此机构在不同时间的不同驱动副位移变化不同,这是因为完成一个封闭的空间曲线,各个驱动副之间要相互协作,不可能同步进行。图6~7中各个曲线都是比较光滑平稳,没有急剧变化,说明该机构的各个驱动副是趋于平稳,也表明此机构性能优良,满足模拟器的机动需求。基于Simmechanics的并联机器人仿真,相对于编程仿真和Simulink仿真不仅简单,而且实现了机构运行的可视化,从而可以方便直观地了解仿真过程中输入与输出的关系,相比于SolidWorks单独仿真精度更高。

6 结论

1) 课题组提出了2PPRS-RPRS并联机构,此机构具有非对称的3条支链,利用修正的Kutzbach-Grübler公式和螺旋理论计算出了机构的自由度为6,可以进行3转和3移的动作。

2) 针对此新型并联机构,用空间约束法和杆长不变的方法求出了机构的位置逆解的解析解。

3) 通过给定机构的初始参数与姿态,运用三维边界搜索法求出了此并联机器人的可达位置工作空间,此空间位置相对于传统的Stewart并联机构的工作空间更大。

4) 利用SolidWorks与Simmechanics对该并联机器人进行联合仿真,比单独一个软件仿真更加精确,验证了机构6自由度的可行性以及位置逆解的正确性。

参考文献:

[1] WECK M, STAIMER D. Parallel kinematic machine tools-current state and future potentials[J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 671-83.

[2] STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1966, 38(4): 30-35.

[3] HUNT K H. Kinematics geometry of mechanisms [M]. Oxford: Clarendon Press, 1978: 3-5.

[4] 李浩, 张玉茹, 王党校. 6-RSS 并联机构工作空间优化算法对比分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 61-67.

[5] MOULY N, MERLET J P. Singular configurations and direct kinematics of a new parallel manipulator [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, France; IEEE, 1992: 338-343.

[6] 高峰, 金振林, 刘辛军, 等. 六自由度虚拟轴机床: CN1261018A [P]. 1999-11-03.

[7] BEHI F. Kinematic analysis for a six-DOF 3-PRPS parallel mechanism[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(5): 561-565.

[8] ALIZADE R I, TAGIYEV N R. A forward and reverse displacement analysis of a 6-DOF in-parallel manipulator [J]. Theory, 1994, 29(2): 343-345.

[9] LIM W K, YANG G, YEO S H, et al. Kinematic analysis and self-calibration of three-legged modular parallel robots [C]//SPIE Conference on Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems II. Boston, Massachusetts; SPIE, 1999: 859-872.

[10] SORLI M, FERRARESI C, KOLARSKI M, et al. Mechanics of TURIN parallel robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(1): 51-77.

[11] 叶伟, 方跃发, 郭盛, 等. 一种新型并联机构的运动分岔特性及运动学分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 9-15.

[12] WU Yangnian, GOSSELIN C M. On the synthesis of a reactionless 6-DOF parallel mechanism using planar four-bar linkages [C]//Proceeding of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Quebec City, Canada, 2002: 310-316.

[13] IEBERT-UPHOFF E, GOSSELIN C M, LALIBERTE T. Thierry lalibert static balancing of spatial parallel platform mechanisms—revisited[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(1): 43-51.

[14] ANGELES J, YANG Guilin, CHEN Iming. Singularity analysis of three-legged, six-DOF platform manipulators with RRRS legs[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(4): 469-475.

[15] YANG Guilin, CHEN Iming, CHEN Weihai. Design and analysis of a 3-RPRS modular parallel manipulator for rapid deployment [C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan; IEEE, 2003: 1250-1255.

[16] 朱延河, 赵杰, 蔡鹤皋. 一种新型双并联操作手构型设计[J]. 机械设计, 2003, 20(8): 35-37.

[17] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 118-119.