

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.03.006

一种新型低耦合并联操作手及其运动学

邓嘉鸣,邵国为,李家宇,孟庆梅,沈惠平,杨廷力

(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:根据基于方位特征(POC)方程的并联机构设计理论和方法,首先,提出了一种可实现 SCARA 运动的新型低耦合度的四自由度并联操作手 CU-2PaRSS-II,详细描述了该机构的拓扑结构;其次,计算了机构的耦合度,并建立了机构的正反解模型;然后,对该机构工作空间内的运动性能进行了分析,定量给出了机构的 2 个运动指标——工作空间体积和转动能力。最后,设计了该操作手样机的三维 CAD 模型。结果表明:该操作手比 I4, Cross-IV 等结构简单,但其工作空间及动平台转动能力相对较大,具有较好的开发、应用价值。

关键词:并联机构;方位特征集;运动学;三平移—转动并联机构;位置正解

中图分类号:TH 112

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)03-0050-12

A Novel Type Parallel Manipulator with Lower Coupling-Degree and Its Kinematics

DENG Jiaming, SHAO Guowei, LI Jiayu, MENG Qingmei, SHEN Huiping, YANG Tingli

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: By using POC equation based on the topological structure synthesis theory and method, a novel 4-DOF SCARA type CU-2PaRSS-II parallel mechanism (PM) with low coupling degree is presented. Firstly, the topological structure of the mechanism is described in brief; secondly, the coupling degree of the mechanism is calculated, and then the forward and inverse models of the mechanism are established; after that, the kinematic performances of the work space of the mechanism are analyzed, and two indexes of the mechanism are given quantitatively, which are the volume of working space and the rotation ability of the moving platform. Lastly, the 3D model for the prototype of the manipulator is designed. The results show that the manipulator is simpler than I4 and Cross-IV in structure, but the volume of the work space and the rotation ability of the moving platform are larger relatively, which has good values in development and application.

收稿日期:2017-11-10。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375062, 514755050);江苏省重点研发计划项目(BE2015043)。

作者简介:邓嘉鸣(1963—),男,江苏常州人,硕士,教授。E-mail:jpujdm@cczu.edu.cn

引用本文:邓嘉鸣,邵国为,李家宇,等.一种新型低耦合并联操作手及其运动学[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(3):50-61.

Key words: parallel mechanism; POC method; kinematics; 3T1R PKMs; direct kinematics

少自由度并联机构较六自由度并联机构而言,具有结构简单,造价低等优点,因此在工业生产领域具有很好的应用前景。目前,国内外已提出的少自由度并联机构多为三自由度并联机构,四自由度的三平移—转动(3T1R)型并联机器人机构类型相对较少,然而这类机构在实际应用中却有着广泛的应用前景。

1985年,洛桑联邦理工大学的 Clavel 教授发明了一类三自由度并联机器人,即著名的 Delta 机械手^[1]。21世纪以来,Delta 系列机器人呈现出向高速、高精度、灵活性等发展方向。Pierrot 团队相继发明了4支链的 H4, I4, Heli4 以及 Par4 等机构^[2-4]。Xie 等^[5]运用 Grassmann 线性几何法和 Atlas 法,综合设计出了一组四自由度 3T1R 并联机构。Rolland L H^[6]设计了2种四自由度 3T1R 并联操作手,分别命名为 Manta 和 Kanuk。P-L Richard 等^[7]对一种部分解耦的四自由度 3T1R 并联机构进行了运动学分析;杨廷力^[8]、金琼^[9]等以单开链(SOC)为单元,提出了输出运动为 3T1R 的并联机器人机构型综合的一种系统方法。Olivier Company^[10]等通过使用一个新的 Jacobian 矩阵,提出了 3T1R 并联机构的运动学模型,并得到机构的运动奇异、内部奇异和末端执行器的可能性运动。

本文首先采用直角坐标法,建立了基于序 SOC 法的机构位置正解求解的建模算法,并采用一维搜索法容易求得其全部正解数值解;又通过导出机构位置反解的解析公式和算例,验证了正解的准确性;进一步,计算给出了该机构的基点工作空间的形状和大小,其比 I4R, Cross-IV 的工作空间分别增大 3.3%, 1.37%;同时,动平台的转动能力比 H4 大 51.74%;为该并联操作手的尺度综合和优化、样机设计与应用奠定了理论基础。

1 机构结构分析

1.1 机构描述

机构由动平台 1、静平台 0、2 条 RSS 型无约束支链,以及 1 条三平移输出的混合支链组成,如图 1 所示,而混合支链又由包含 2 条分别含有 4 个球副(S_a, S_b, S_c, S_d)的平行四边形子混合支链。其中,构件 2 可视为子动平台 2。

装配时,为使球副 S_a, S_b, S_c, S_d 的球心构成平行四边形,须在平行四边形中配置一杆带两转动副(R_a, R_b)的结构(其长度等于其一边长度即可);动平台 1 上的转动副 R_3 的轴线须平行于动平台 1 平面的法线;静平台 0 上的 4 个主动副 R_{11}, R_{21}, R_{31} 及 R_{41} , 分别位于各边中点,且 $R_{11} \parallel R_{21}, R_{31} \perp R_{41}$, 动平台 1 可实现三平移以及 1 个绕 R_3 的转动输出。

1.2 耦合度 κ 的计算

由文献[11]知,运动链中的第 j 个单开链(Single-Open-Chian)的约束度为

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^{mj} f_i - I_j - \xi_{Lj} = \begin{cases} \Delta_j^- = -5, -4, -3, -2, -1 \\ \Delta_j^0 = 0 \\ \Delta_j^+ = +1, +2, +3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

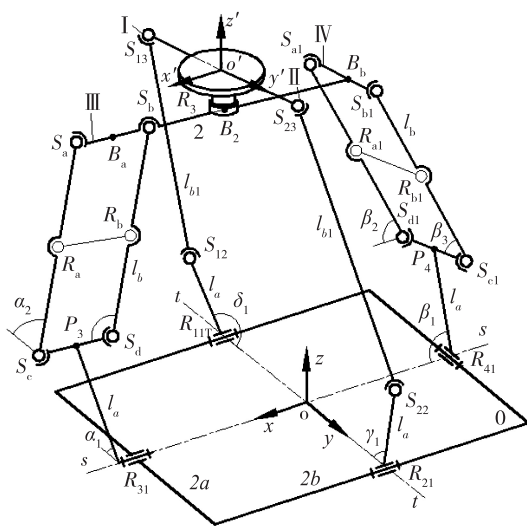


图1 CU-2PaRSS-II 机构及位置求解模型

式中: m_j 为第 j 个 SOC_j 的运动副数; f_i 为第 i 个运动副的自由度(不含局部自由度); I_j 为第 j 个 SOC_j 的驱动副数; ξ_{Lj} 为第 j 个回路的独立位移方程数。

对一个基本运动链(BKC)而言,须

$$\sum_{j=1}^v \Delta_j = 0$$

因此,耦合度为

$$\kappa = \Delta_j^+ = |\Delta_j^-| = \frac{1}{2} \min \left\{ \sum_{j=1}^v |\Delta_j| \right\} \quad (2)$$

式中: κ 揭示了机构基本回路(位置)变量之间的关联、依赖程度; κ 值越大,机构的耦合性越强,复杂度越高^[11]。

1) 确定混合支链

它由支链Ⅲ,Ⅳ组成的三平移混合支链、转动副 R_3 以及支链Ⅰ构成 HSOC_1 ,即

$$\text{HSOC}_1 \{ -R_{31} \parallel P^{(4s)} - P^{(4s)} - R^{(4s)} - P^{(4s)} - P^{(4s)} - R^{(4s)} \parallel P_{41} \perp R_3 - S_{13} - S_{12} - R_{11} - \}$$

2) 确定 SOC_2

SOC_2 仅由支链Ⅱ组成,即

$$\text{SOC}_2 \{ -S_{23} - S_{22} - R_{21} - \}$$

3) 耦合度计算

由式(2),可得

$$\kappa = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j| = \frac{1}{2} | +1 | + | -1 | = 1$$

该机构只包含一个 BKC,其耦合度为 1,因此,可用一维搜索求出全部数值解^[12]。

2 位置分析

2.1 位置正解分析

2.1.1 坐标系建立及符号标注

该并联机构的位置正解问题可描述为:已知驱动臂输入转角 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$,求动平台 1 的位置(x, y, z)和姿态角 γ 的值。

如图 1 所示,静坐标系 $O-XYZ$ 的原点在静平台 0 的几何中心, X 轴与 $R_{31}R_{41}$ 连线重合, Y 轴与 $R_{11}R_{21}$ 连线重合, Z 轴由右手法则确定;动坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 原点位于动平台 1 的连杆 $S_{13}S_{23}$ 中点, X' 轴垂直于 $S_{13}S_{23}$ 连线, Y' 轴平行于 $S_{13}S_{23}$ 连线, Z' 轴由右手法则确定。

为理解方便,将图 1 机构展开为平面图,如图 2 所示,设静平台 0 为矩形,长和宽分别为 $2a, 2b$;动平台 1 设为连杆,其长度为 $2m_1$,即 $S_{13}S_{23} = 2m_1$ 。

动平台 1 绕转动副 R_3 的转角为动平台 1 的输出姿态角 γ ,用 R_3O' 的连线与静坐标系的 OX 轴的夹角表示,且以逆时针方向为正值。

其中, B_3 为 B_aB_b 杆中点,令 $R_3B_3 = q_1, B_aB_b = l$;令

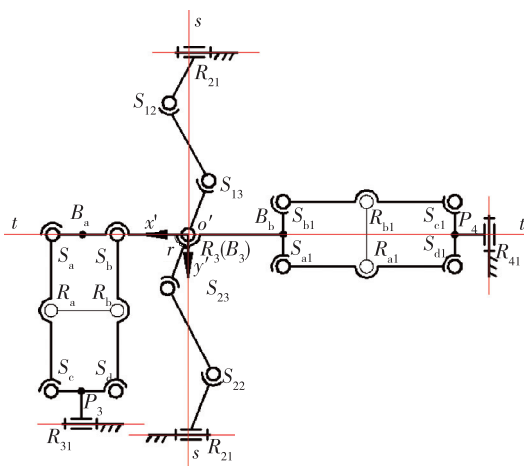


图 2 CU-2PaRSS-II 机构的俯视展开图

$$R_{11}S_{12}=R_{21}S_{22}=l_{a1}, S_{12}S_{13}=S_{22}S_{23}=l_{b1}; R_{31}P_3=R_{41}P_4=l_a, P_3B_a=P_4B_b=l_b。$$

Ⅲ,Ⅳ支链的主动输入角分别为 α_1, β_1 , 如图3所示, 逆时针方向角度为正值; 平行四边形平面与底面夹角分别为 α_2, β_2 , 而其内摆角分别为 α_3, β_3 , 如图3所示, 角度逆时针方向为正值。

I, II支链的主动输入角分别为 γ_1, δ_1 , 连杆 $S_{13}S_{12}, S_{23}S_{22}$ 在空间的位置, 分别用其与静坐标系的 X, Y, Z 轴的夹角表示, 即分别为 $\gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 以及 $\gamma_5, \gamma_6, \gamma_7$ 表示, 如图4所示。

2.1.2 基于序 SOC 的机构位置正解求解原理及算法

由式(1)可知, 单开链的约束度为正值、零、负值3种形式, 其物理意义是: ①约束度为正值 $SOC(\Delta_j^+)$, 会使机构自由度增加 Δ_j^+ ; 为确定机构的运动, 需在约束度为正值 $SOC(\Delta_j^+)$ 上设定 Δ_j^+ 虚拟变量; ②约束度为零 $SOC(\Delta_j^0)$, 不影响机构自由度, 其运动具有确定性, 即其位置正解能独立求解; ③约束度为负值 $SOC(\Delta_j^-)$, 使机构自由度减少 $|\Delta_j^-|$, 即对机构建立 $|\Delta_j^-|$ 个约束方程; ④因 $SOC(\Delta_j^+)$ 中的虚拟变量数目 Δ_j^+ , 恰等于约束方程数目 $|\Delta_j^-|$, 因此, 易解出 Δ_j^+ 个变量的真实值。特别是当 $\Delta_j^+ = |\Delta_j^-| = 1$ 时, 易用一维搜索法求得。

根据上述求解原理, 进一步给出该机构基于序 SOC 的位置正解的求解算法。

Step 1: 位置方程的建立

1) 对于第一个单开链

HSOC₁{ $R_{31} \parallel P^{(4s)} - P^{(4s)} - R^{(4s)} - P^{(4s)} - P^{(4s)} - R^{(4s)} \parallel R_{41} \perp R_3 - S_{13} - S_{12} - R_{11} -$ } 而言, 若设复杂支链($-P_1^{(4s)} - P_1^{(4s)} - R_1^{(4s)}$)构成的平行四边形内角 α_3 为虚拟初值 α_3^* , 则可由 HSOC₁ 与 HSOC₁ 中的 I 支链求得: 动平台 1 上球副 S_{23} 的坐标, 以及 α_2, γ , 它们均为 α_3^* 的具体函数表达式(记号 * 表示该值为虚拟赋值, 下同)。

2) 对第二个单开链 SOC₂{ $-S_{23} - S_{22} - R_{21} -$ } 而言, 在其上建立杆长约束方程

$$S_{22}S_{23}=l_{b1} \quad (3)$$

建立的方程中必含有虚拟赋值 α_3^* 。

Step 2: 利用一维搜索法, 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 不断改变虚拟赋值 α_3^* 的初值, 直到上述杆长约束方程(3)满足为止。此时, 对应的虚拟赋值 α_3^* 即为 α_3 的真实值, 将其代回计算式, 即得到该并联机构位置正解的一组实数解。

2.1.3 基于 SOC 的位置建模分析

1) 在约束度为正的 HSOC₁ 上建模

①由 HSOC₁ 中的 Ⅲ, Ⅳ支链, 分别得动坐标系原点 O' 坐标

$$\begin{bmatrix} x_{o'} \\ y_{o'} \\ z_{o'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - l_b \cos \alpha_3 - m_1 \\ -l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 \\ l_a \sin \alpha_1 + l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 + q_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

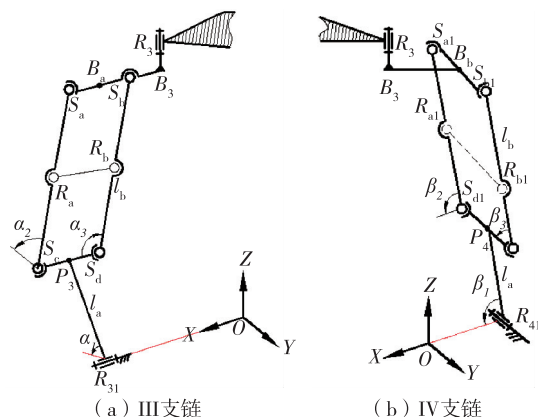


图3 机构Ⅲ,Ⅳ支链计算模型

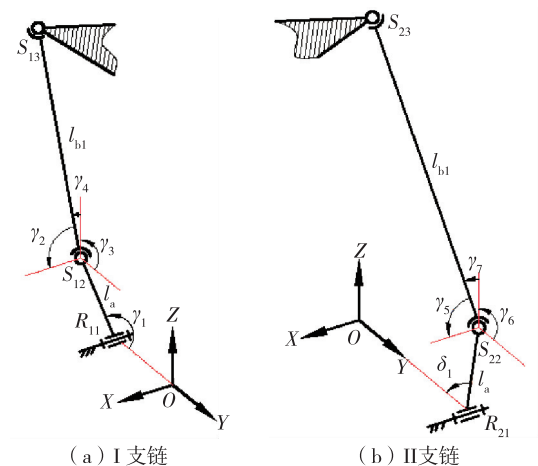


图4 机构Ⅰ,Ⅱ支链计算模型

$$\begin{bmatrix} x_{o'} \\ y_{o'} \\ z_{o'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a + l_a \cos \beta_1 + l_b \sin \beta_3 \cos \beta_2 + m_1 \\ -l_b \cos \beta_3 + m_1 \\ l_a \sin \beta_1 + l_b \sin \beta_3 \sin \beta_2 + q_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(4)、式(5),则有

$$\begin{cases} t_1 = l_b \cos \alpha_3 + l_b \sin \beta_3 \cos \beta_2 \\ t_2 = -l_b \cos \alpha_3 + l_b \sin \beta_3 \cos \beta_2 \\ t_3 = l_b \sin \beta_3 \sin \beta_2 - l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 \end{cases}$$

式中: $t_1 = 2a + l_a \cos \beta_1 - 2m$; $t_2 = -l_a \cos \alpha_1$; $t_3 = l_a \sin \alpha_1 - l_a \sin \beta_1$ 。

为消除 β_3 , 令

$$k_1 = \tan \alpha_2 / 2 \quad (6)$$

并进一步化简,有

$$(k - t_2)k_1^2 + 2t_3k_1 + k + t_2 = 0$$

其中,

$$k = \frac{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 2t_1l_b \cos \alpha_3}{2l_b \sin \alpha_3}$$

解之有

$$k_1 = \frac{-t_3 \pm \sqrt{t_3^2 - k^2 + t_2^2}}{k - t_2} \quad (7)$$

由式(7)可知, α_2^* 为虚拟变量 α_3^* 的函数, 即

$$\alpha_2^* = f_1(\alpha_3^*)$$

②由 I 支链, 得 S_{12} , S_{13} 点的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{S_{12}} \\ y_{S_{12}} \\ z_{S_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a - l_a \cos \gamma_1 \\ l_a \sin \gamma_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{S_{13}} \\ y_{S_{13}} \\ z_{S_{13}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a - l_b \cos \alpha_3 - m_1 - m_1 \cos(\gamma - \pi/2) \\ -l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 - m_1 \sin(\gamma - \pi/2) \\ l_a \sin \alpha_1 + l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 + q_1 \end{bmatrix}$$

进一步, 由杆长约束条件, 有

$$A_1 \sin \gamma + B_1 \cos \gamma + C_1 = 0 \quad (8)$$

式中: $S_{12}S_{13} = l_{b1}$

$$\begin{cases} A_1 = -2m_1(a - m_1 - l_b \cos \alpha_3) \\ B_1 = 2m_1(l_a \cos \gamma_1 - a - l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2); \\ C_1 = (a - m_1 - l_b \cos \alpha_3)^2 + m_1^2 + (l_a \cos \gamma_1 - l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 - a)^2 + \\ \quad (l_a \sin \alpha_1 - l_a \sin \gamma_1 + l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 + q_1)^2 - l_{b1}^2 \end{cases} \quad (9)$$

令 $k_2 = \tan(\gamma/2)$, 解之有

$$k_2 = \frac{-A_1 \pm \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{C_1 - B_1} \quad (10)$$

可知, 输出转动角 γ^* 也为虚拟变量 α_3^* 的函数, 即

$$\gamma^* = f_2(\alpha_3^*)$$

2)在约束度为负的 SOC_2 上建模

由 II 支链,得 S_{22}, S_{23} 点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{S_{22}} \\ y_{S_{22}} \\ z_{S_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -a + l_a \cos \delta_1 \\ l_a \sin \delta_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{S_{23}} \\ y_{S_{23}} \\ z_{S_{23}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a + l_b \cos \alpha_3 - m_1 - m_1 \cos(\gamma - \pi/2) \\ -l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 - m_1 \sin(\gamma - \pi/2) \\ l_a \sin \alpha_1 + l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 + q_1 \end{bmatrix}$$

进一步,由杆长约束 $S_{22}S_{23} = l_{b1}$,建立其位置相容方程,即

$$f(\alpha_3^*) = [a - m_1 - l_b \cos \alpha_3^* + m_1 \cos(\gamma^* - \pi/2)] + [a - l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3^* \cos \alpha_2^* - m_1 \sin(\gamma^* - \pi/2) - l_a \cos \delta_1]^2 (l_a \sin \alpha_1 + l_b \sin \alpha_3^* \sin \alpha_2^* - l_a \sin \delta_1 + q_1)^2 - l_{b1}^2 \quad (11)$$

在 $(0^\circ, 360^\circ)$ 内通过改变 α_3^* 的赋值,使 $f(\alpha_3^*) = 0$,满足此式的 α_3 为真实值,再将真实的 α_3 代入式(4),式(6),式(7)即可得到动平台 1 上 O' 的位置 $O'(x, y, z)$;代入(9),即可得动平台 1 上 O' 的姿态角 γ 。

为理解方便,上述各运动副的位置求解,可按图 5 的流程图解。

2.2 位置反解分析

该并联机构的反解问题可描述为:已知动平台的位置 (x, y, z) 与姿态角 γ ,求驱动臂输入转角 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$ 。

1)由式(4)得

$$x = a - l_b \cos \alpha_3 - m_1 \quad (12)$$

$$y = -l_a \cos \alpha_1 - l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 \quad (13)$$

$$z = l_a \sin \alpha_1 + l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 + q_1 \quad (14)$$

由式(12)可得

$$\cos \alpha_3 = -\frac{x + m_1 - a}{l_b}$$

由式(13)、式(14)得

$$\begin{cases} y + l_a \cos \alpha_1 = -l_b \sin \alpha_3 \cos \alpha_2 \\ z - l_a \sin \alpha_1 - q_1 = l_b \sin \alpha_3 \sin \alpha_2 \end{cases}$$

令

$$\begin{cases} P_1 = y \\ P_2 = z - q_1 \\ P_3 = l_b^2 (1 - \cos^2 \alpha_3) \\ P_4 = P_1^2 + P_2^2 + l_a^2 - P_3 \\ P_5 = 2P_1 l_a \\ P_6 = -2P_2 l_a \end{cases}$$

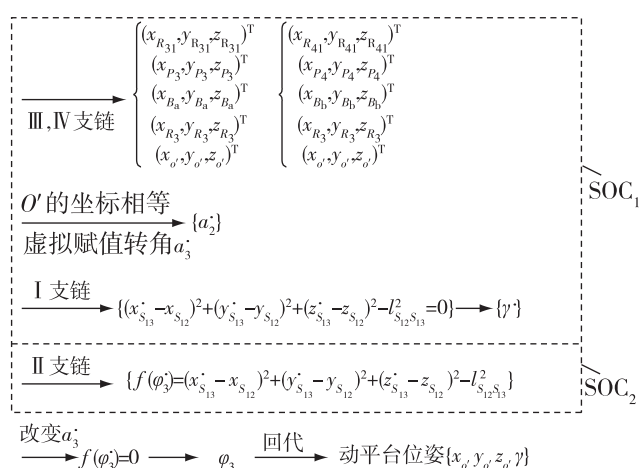


图5 CU-2PaRSS-II 机构位置正解求解的流程图

则

$$P_4 + P_5 \cos \alpha_1 + P_6 \sin \alpha_1 = 0$$

令

$$t_a = \tan(\alpha_1/2) \quad (15)$$

解得

$$t_a = \frac{-P_6 \pm \sqrt{P_5^2 + P_6^2 - P_4^2}}{P_4 - P_5} \quad (16)$$

因此,由式(16)可直接求出驱动副 R_{31} 的输入转角 α_1 。此时 α_1 有 2 个解,可根据输入变量的连续变化规则确定唯一的输入转角。

2)由式(5)可得

$$x = -a + l_a \cos \beta_1 + l_b \sin \beta_3 \cos \beta_2 + m_1 \quad (17)$$

$$y = -l_b \cos \beta_3 + m_1 \quad (18)$$

$$z = l_a \sin \beta_1 + l_b \sin \beta_3 \sin \beta_2 + q_1 \quad (19)$$

由式(18)得

$$\cos \beta_3 = -\frac{y - m_1}{l_b}$$

由式(17)及(19),且令

$$\begin{cases} P_7 = x + a - m_1 \\ P_8 = l_b^2 (1 - \cos^2 \beta_3) \end{cases}$$

则

$$(P_7 - l_a \cos \beta_1)^2 + (P_2 - l_a \sin \beta_1)^2 = P_8$$

又令

$$P_9 = P_7^2 + P_2^2 + l_a^2 - P_8$$

$$P_{10} = -2P_7 l_a$$

$$P_{11} = -2P_2 l_a$$

则

$$P_9 + P_{10} \cos \beta_1 + P_{11} \sin \beta_1 = 0 \quad (20)$$

令

$$t_b = \tan(\beta_1/2)$$

解得

$$t_b = \frac{-P_{11} \pm \sqrt{P_{10}^2 + P_{11}^2 - P_9^2}}{P_9 P_{10}} \quad (21)$$

同样,根据式(21)可直接求出驱动副 R_{41} 的输入转角 β_1 。

3)由 I 支链杆长约束 $S_{12}S_{13} = l_{b1}$ 且令

$$\begin{cases} P_{12} = y - a + m_1 \cos \gamma \\ P_{13} = (x + m_1 \sin \gamma)^2 \\ P_{14} = P_{12}^2 + z^2 + l_a^2 + P_{13} - l_{b1}^2 \\ P_{15} = 2P_{12} l_a \\ P_{16} = -2z l_a \end{cases}$$

则

$$P_{14} + P_{15} \cos \gamma_1 + P_{16} \sin \gamma_1 = 0$$

令

$$t_c = \tan(\gamma_1/2) \quad (22)$$

解得

$$t_c = \frac{-P_{16} \pm \sqrt{P_{15}^2 + P_{16}^2 - P_{14}^2}}{P_{14} - P_{15}} \quad (23)$$

根据式(22)、式(23)可直接求出驱动副 R_{11} 的输入转角 γ_1 。

4)由 II 支链杆长约束 $S_{22}S_{23} = l_{b1}$, 及式(11), 且令

$$\begin{cases} P_{17} = [x + m_1 \cos(\gamma - \pi/2)]^2 \\ P_{18} = y + m_1 \sin(\gamma - \pi/2) + a \\ P_{19} = P_{18}^2 + z^2 + l_a^2 + P_{17} - l_{b1}^2 \\ P_{20} = -2P_{18}l_a \\ P_{21} = -2zl_a \end{cases}$$

则

$$P_{19} + P_{20} \cos \delta_1 + P_{21} \sin \delta_1 = 0 \quad (24)$$

令

$$t_d = \tan(\delta_1/2)$$

解得

$$t_d = \frac{-P_{21} \pm \sqrt{P_{20}^2 + P_{21}^2 - P_{19}^2}}{P_{19} - P_{20}} \quad (25)$$

根据式(25)可直接求出驱动副 R_{21} 的输入转角 δ_1 。

2.3 实例验算

2.3.1 正解算例

因本机构与 H4(I4R) 均含有平行四边形的复杂支链, 为便于性能比较, 取与 H4(I4R) 平行四边形支链相同的尺寸参数, 即 $l_a = 375$, $l_b = 800$, $l_{a1} = 375$, $l_{b1} = 880$, $a = 400$, $b = 400$; 其他参数为 $m_1 = 300$, $q_1 = 25$; (单位: mm)。令两组输入角数据:

$$\text{I}' : \alpha_1 = 59.5^\circ; \beta_1 = 115.9^\circ; \gamma_1 = 134.1^\circ; \delta_1 = 112.2^\circ;$$

$$\text{II}' : \alpha_1 = 83.5^\circ; \beta_1 = 95.1^\circ; \gamma_1 = 98.4^\circ; \delta_1 = 117.1^\circ.$$

根据式(4)~式(11)进行编程, 设 α_3^* 从 $0^\circ \sim 360^\circ$, 运用一维搜索法, 由 I、II 组输入角可分别求得四组实数正解, 如表 1 所示。

2.3.2 逆解算例

将 I 组中的 No.3*, II 组中的 No.1* 正解值, 分别代入式(15)、式(20)、式(22)及式(24), 相应地得到 16 组实数反解, 其中, 各有一组反解分别为:

$$\text{I}'' : \alpha_1 = 59.5^\circ; \beta_1 = 115.9^\circ; \gamma_1 = 134.3^\circ; \delta_1 = 112.2^\circ;$$

$$\text{II}'' : \alpha_1 = 83.5^\circ; \beta_1 = 95.1^\circ; \gamma_1 = 98.4^\circ; \delta_1 = 117.0^\circ.$$

它们分别与正解求解时设定的输入角 I, II 一

表 1 CU-2PaRSS-II 机构的位姿正解数值

No.	x/mm	y/mm	z/mm	$\gamma/(\circ)$
I	1	31.113	24.486	948.5
	2	14.391	13.148	1001.4
	3*	5.574	11.385	956.5
	4	43.145	-54.326	845.6
II	1*	36.581	45.472	643.3
	2	67.643	-67.018	893.1
	3	46.543	25.891	961.3
	4	-34.173	39.751	1010.3

致,故认为正反解均正确。

3 工作空间及动平台转动能力

3.1 工作空间分析方法

并联机构的工作空间^[13]即为末端执行器的工作区域,其大小是衡量并联机构性能的一个重要指标。本文采用极限边界搜索法^[14],来分析该并联机构拓扑结构的工作空间,即预先设定该机构工作空间的 z 向角度范围,通过改变搜索半径 ρ 以及搜索角度 θ 来找到工作空间的边界。为此设 $400 \leq z \leq 1\,200$,且 $\Delta z = 10$; $-\pi \leq \theta \leq \pi$; $0 \leq \rho \leq 1\,000$,约束条件:输入角 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$ 的取值为 $[0, \pi]$ 。

3.2 工作空间分析结果

运用 MATLAB 软件编程,得到该 SCARA 并联机构工作空间的三维立体图如图 6 所示,及其各 X-Y 截面图如图 7 所示。

从图 7 可以看出:

1) 当 $z \in [600, 1\,000]$ 时,该机构工作空间的 X-Y 截面图关于 $t-t$ 直线基本对称。

2) 当 $400 \leq Z \leq 600$ mm 时,工作空间内部有空洞(图 7 未给出);随着 z 的增加,空洞消失,不同高度 Z 的工作空间的 X-Y 截面为规则图形,但截面面积会逐渐减小。

3) 在不考虑运动副转角约束、连杆干涉的影响,在相同参数及搜索范围的条件下,该机构工作空间均比 I4R(H4), CrossIV-3 大,具体如下:

① 引用文献[15]的相应参数,给定相同的搜索范围: $0 \leq \rho \leq 1\,000$, $500 \leq z \leq 1\,150$,计算出 I4 的工作空间体积为 $6.166\,8 \times 10^8 \text{ mm}^3$;而该机构为 $6.373\,1 \times 10^8 \text{ mm}^3$,比 I4 机器人增加了 3.3%;

② 引用文献[17]的相应参数, CrossIV-3 的工作空间体积为 $4.427\,4 \times 10^8 \text{ mm}^3$,而该机构的工作空间为 $4.488\,1 \times 10^8 \text{ mm}^3$,比 CrossIV-3 增加了 1.37%。

3.3 动平台转动能力

动平台转动能力^[17-18]即为末端执行器的在工作区域内的转角范围,其大小是衡量并联机构输出转动灵活性能的一个重要指标。

在不考虑片中空洞的存在,即在 $z \in [600, 1\,000]$ 范围内,取任一机构 Z 向 X-Y 截面,可得到动平台转动能力,为节省篇幅,本文取 $z = 1\,000$,得到该机构 Z 向 X-Y 截面的动平台转动能力,如图 8、图 9 所示,及 H4 的转动能力,如图 10、图 11 所示。

从图 8~图 11 可以看出:

当 $Z = 1\,000$ 时,该机构动平台在 X-Y 平面的转动能力为 $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$; H4 的转动能力相同,

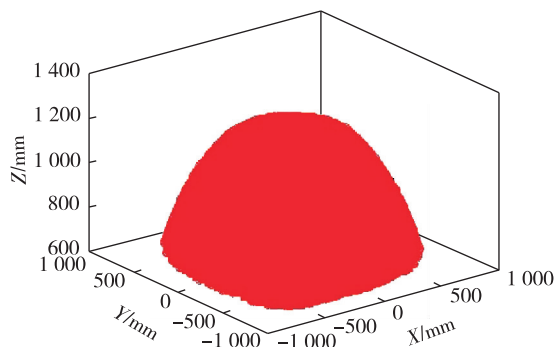


图 6 CU-2PaRSS-II 机构的工作空间图

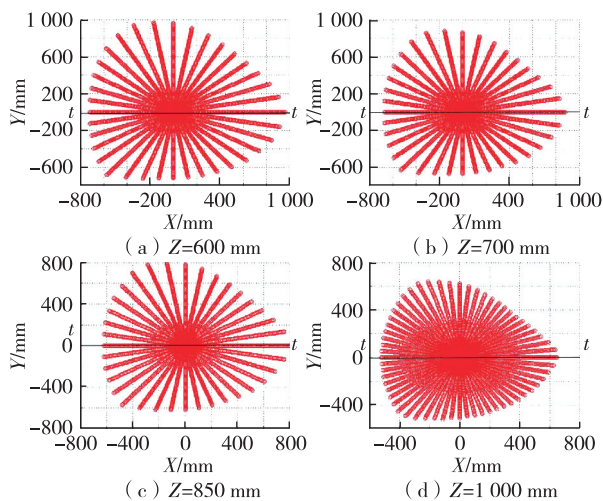


图 7 并联机构工作空间各 Z 向的 X-Y 截面图

均为 $-120^{\circ} \leq \gamma \leq +110^{\circ}$, 相比 H4 的 γ_{\max} (右极限角) 的分布增加了 60° , 而相比 H4 的 γ_{\min} (左极限角) 的分布增加了 70° , 进而总体增加了 56.52% 。

具体比较如下:

当任取一点 A $(-100, -237, 1\ 000)$ 时, 即 $X = -100\text{mm}$, $Y = -237\text{mm}$, $Z = 1\ 000\text{mm}$ 时, H4 机构的转动角度为 $\gamma_{\max} = 40^{\circ}$, $\gamma_{\min} = -20^{\circ}$, 而该机构的转动角度为 $\gamma_{\max} = 100^{\circ}$, $\gamma_{\min} = 20^{\circ}$, 容易得出: 该机构转动能力比 H4 机构大 60° (左极限角)。而该机构动平台无需特殊转角放大装置, 便可获得较大的转角范围。

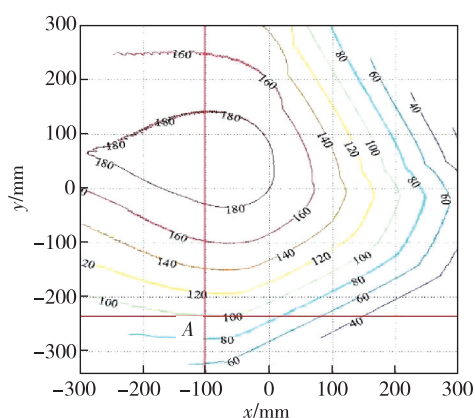


图8 CU-2PaRSS-II 机构在 $Z=1\ 000\text{mm}$ 时 γ_{\max} 的分布

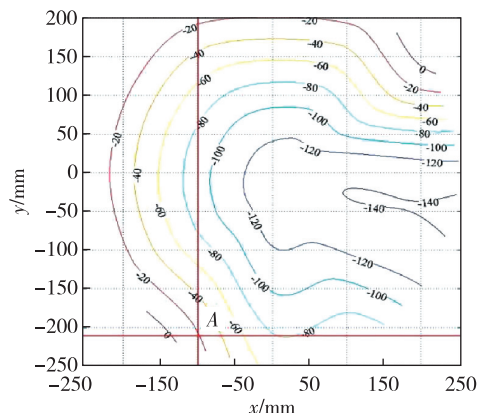


图9 CU-2PaRSS-II 机构在 $Z=1\ 000\text{mm}$ 时 γ_{\min} 的分布

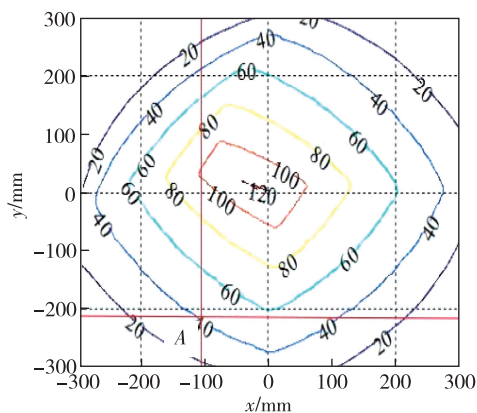


图10 H4 在 $Z=1\ 000\text{mm}$ 时 γ_{\max} 的分布

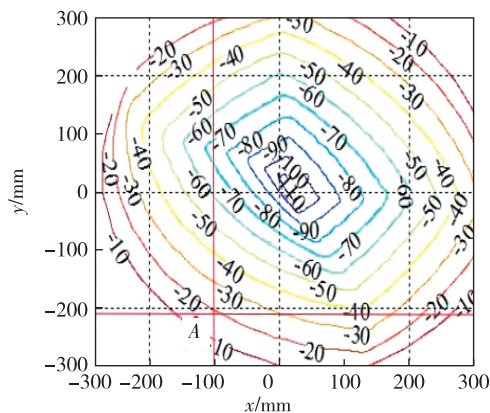


图11 H4 在 $Z=1\ 000\text{mm}$ 时 γ_{\min} 的分布

4 样机的 CAD 建模

该双平台 3T1R 并联机构的虚拟样机设计, 如图 12 所示, 它包含静平台 0、动平台 1、子动平台 2、RSS 支链 3 和复杂支链 4, 以及标准驱动系统 5, 共 6 大部件, 可分别建立它们的 CAD 模型单元。

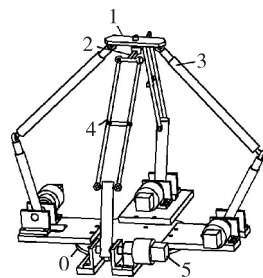


图12 CU-2PaRSS-II 的 CAD 图

4.1 支链设计

支链是并联操作手传递运动、承受载荷的重要单元,支链的结构设计须在满足刚度和强度的前提下,应尽量减小其质量。为此,四条支链中的主动臂均采用材质为铝材 7075 的工字型结构,该型材具有密度小、强度高、耐腐蚀性好、易加工等特点;而从动臂均选用具有质地轻、强度高以及抗拉性高特点的碳纤维管,其 CAD 结构如图 13 所示。

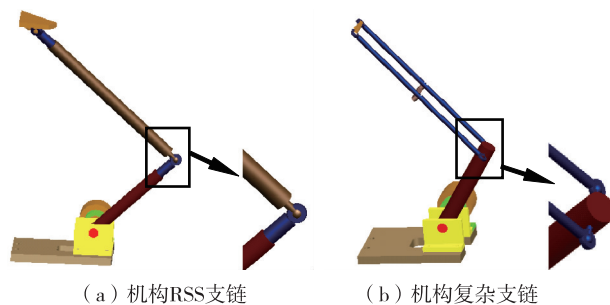


图 13 CU-2PaRSS-II 的支链结构图

4.2 动、静平台的设计

动平台 1 与子动平台 2 相互平行,分别连接相对应的 RSS 支链、复杂支链从动臂一端的球关节,并通过旋转关节连接,组成双动平台结构,其中,旋转关节通过密封角接触轴承安装连接,可使末端执行器实现绕垂直方向的旋转运动。

而静平台 0 由圆形的钢质底座上固定安装 4 块结构相同的电机安装板组成,4 个伺服电机对称地安装于 4 块电机安装板上,为了避免主动臂与电机安装支架发生碰撞受到损坏,在电机安装板上开一个 U 型槽,其结构如图 14 所示。

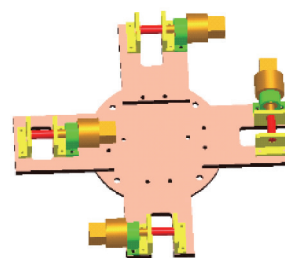


图 14 静平台设计

5 结 论

1)提出了一种低耦合度的四自由度 SCARA

并联机构 CU-2PaRSS-IV,其动平台布置借鉴于 H4,但总体结构比 H4 机构更为简单、制造装配更为容易。

2)基于序 SOC 的机构位置正解建模算法,建立了一个仅含一个变量的杆长相容性方程,用一维搜索求解得到了该机构的全部正解数值解。

3)基于机构位置反解,计算分析了机构的工作空间性能,同时,分析了该机构的奇异位形。

该并联操作手结构简单,而工作空间和动平台转动能力均比现有的 3T1R 机器人大,因而具有较好开发价值。本文工作为后续的该并联操作手的尺度综合与优化、样机设计、控制及动力学分析奠定了基础。

参考文献:

- [1]CLAVEL R. Device for displacing and positioning an element in space; EP0250470 B1[P]. 1991-07-17.
- [2]PIERROT F, MARQUET F, GILT. H4 parallel robot: Modeling, design and preliminary experiments[C]//IEEE Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE,2001: 3256-3261.
- [3]PIERROT F, NABAT V, COMPANY O, et al. Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator: from academia to industry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(2): 213-224.
- [4]NABAT V, DE LA RODRIGUEZ M, COMPANY O, et al. Very high speed parallel robot for pick-and-place[C]//

- IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2005: 553-558.
- [5] XIE F, LI T, LIU X. Type synthesis of 4-DOF parallel kinematic mechanisms based on grassmann line geometry and atlas method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6):1073-1081.
- [6] ROLLAND L H. The manta and the kanuk: novel 4-DOF parallel mechanisms for industrial handling[J]. Proc, 1999, 67:67-78.
- [7] RICHARD P L, GOSSELIN C, KONG X. Kinematic analysis and prototyping of a partially decoupled 4-DOF 3T1R parallel manipulator[J]. ASME J Mech Des, 2007, 129(6): 611-616.
- [8] YANG T L, JIN Q, LIU A X, et al. Structure synthesis of 4-dof(3-Translation and 1-rotation) parallel robot mechanisms based on the units of single-opened-chain[C]// Proceedings of the ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- [9] 金琼, 杨廷力, 刘安心, 等. 基于单开链单元的三平移一转动并机器人机构型综合及分类[J]. 中国机械工程, 2002, 38(8):1038-1043.
- [10] COMPANY O, KRUT S, PIERROT F. Internal singularity analysis of a class of lower mobility parallel manipulators with articulated traveling plate[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1): 1-11.
- [11] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] 沈惠平, 尹洪波, 王振, 等. 基于拓扑结构分析的求解 6-SPS 并联机构位置正解的研究[J]. 机械工程学报, 2013(21): 70-80.
- [13] 于晖, 孙立宁, 刘品宽, 等. 新型 6-HTRT 并联机器人工作空间和参数研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 293-298.
- [14] 徐宗刚. 3-PCR 并联机构工作空间及轨迹规划的研究与应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
- [15] 刘平松. I4 型并联机器人全域性能及其优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [16] 李玉航, 梅江平, 刘松涛, 等. 一种新型 4 自由度高速并联机械手动力尺度综合[J]. 机械工程学报, 2014(19): 32-40.
- [17] 张震, 沈惠平, 尹洪贺, 等. 一种新型 3T1R 并联机构的设计及其运动学分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(5):57-67.
- [18] XIE F, LIU X J. Design and development of a high-speed and high-rotation robot with four identical arms and a single platform[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2015, 7(4):041015.

(责任编辑:李艳)