

3T1R 并联机构结构设计与位置分析

石志新¹ 叶梅燕² 罗玉峰¹ 杨廷力³

(1. 南昌大学机电工程学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学理学院, 南昌 330031; 3. 中国金陵石化公司, 南京 210037)

摘要: 基于方位特征集理论(POC),设计并研究了一种三平移—转动(3T1R)并联机构。首先,应用方位特征集方法,综合了一批满足功能要求的并联机构;然后,综合考虑实际应用要求,从中优选出一种具有开发潜力的并联机构,分析结果表明:该机构具有全对称性、可折叠性及承载能力强、工作空间大等特点;最后结合实例给出了优选机构的位置正、逆解方程及其求解算法,结果表明:其位置逆解方程可解析求解,且最多存在16组解;而正解方程不能解析求解,且最多存在8组解。

关键词: 三平移—转动并联机构; 结构特性; 位置分析

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0364-06

Structure Design and Displacement Analysis of 3T1R Parallel Mechanism

Shi Zhixin¹ Ye Meiyan² Luo Yufeng¹ Yang Tingli³

(1. School of Mechanical & Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2. School of Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3. Jinling Petrochemical Corporation, Nanjing 210037, China)

Abstract: The parallel manipulator with three-dimension translation and one-dimension rotation (in short, 3T1R) has wide requirements in processing technology, such as high-speed catch, positioning assembly, transportation. A novel 3T1R parallel manipulator was presented based on the theory of position and orientation characteristics (in short, POC). A complete type synthesis of parallel manipulator that can perform 3T1R motion was made based on the theory of POC. Then, one topology was selected from the different possibilities of parallel manipulators after imposing some practical requirements. The selected parallel manipulator was composed of four identical arms and a single platform, and the composite parallelogram structure in each arm brought in better limb stiffness. The parallel manipulator had characteristics of full symmetry, fold ability, good stiffness, large work space, and so on. In addition, the forward and inverse displacement equations of the parallel manipulator were derived, which had great importance when implemented in velocity control. The inverse position equation had 16 solutions at most, and the forward position equation only had 8 solutions at most. Finally, the solution algorithm of the forward displacement equations was given, and a numerical example was provided to confirm the efficiency of the solution procedure. The research results had a reference value for follow-up studies of the new manipulator and its application.

Key words: 3T1R parallel manipulator; structure characteristics; displacement analysis

引言

在高速抓放、定位装配、搬运、分拣、上下料等工

艺中,尤其在需要调整工件姿态的场合下,三平移—转动(3T1R)功能的并联操作手存在广泛应用需求。人们在3T1R并联操作手的设计与研究方面取得了

丰硕成果:文献[1-5]基于经验和灵感提出了若干种新型并联操作手;文献[6-11]研究了奇异性、运动/动力传递性能等性能指标;文献[12-13]分别基于单开链理论、螺旋理论综合了一批新型机构,但未结合实际应用要求提出优选准则和方法;文献[14]侧重考虑刚度和承载能力,综合了一种 X4 型机构并进行了优化设计。纵观上述研究成果,不难发现尚有如下问题值得深入研究:①完善机构综合理论和方法,从而综合出尽可能多的拓扑结构。②根据实际应用要求提出优选准则和方法,以便从综合出的众多机构中筛选出理想机构用于研制和开发实用化产品。③开发自动综合及优选的软件。

本文基于方位特征集理论,综合一批 3T1R 并联机构,然后综合考虑对称性、承载能力、工作空间等性能,从中筛选出一种综合性能优越的机构,最后对优选的机构进行位置正、逆解分析。

1 机构综合与优选

1.1 机构综合

目前机构结构综合的主要方法有:基于螺旋理论的方法、基于位移子群的方法和基于方位特征集的方法。由于方位特征集的综合方法具有以下特点^[15-18]:①得到非瞬时机构。②得到的机构存在的几何条件更具有一般性。③可涵盖位移子群和位移子流形机构。④数学工具与运算规则较简单,便于理解和运用,因此本文应用方位特征集(POC)方法对 3T1R 并联机构进行拓扑结构综合,其主要步骤为:

(1)支路结构综合由于动平台是在各支链的共同作用下完成运动的,故支链的方位特征集 M_i 应包含动平台的方位特征集 M ,即

$$M_i \supseteq M = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}$$

(1)

其中 t^3 ——空间 3 维平移 r^1 ——1 维转动
文献[15]已给出满足式(1)的支路结构类型,如表 1 所示。

表 1 中的符号含义为:“//”表示平行;“⊥”表示垂直;“-”表示交叉且不垂直;“/”表示共线;“3T”表示三平移并联机构;“4R”表示平行四边形机构;“4S”表示由 4 个球副和 2 个转动副构成的平行四边形机构;“5R”表示平面五杆单回路机构。

(2)对表 1 中的支路进行排列组合,得到支路组合方案,并确定各支路在两平台的装配几何条件。

(3)判定机构消极运动副及检验自由度,剔除不合理的方案。

(4)确定驱动副。

表 1 支链结构类型

Tab.1 Structure types of limb

方位特征集	单开链	混合支链
$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}$	$\{P//R//R//R\}$ 	$\{4R-R//R//R\}$
	$\{P-P-R//R\}$ 	$\{P-4R-R//R\}$
	$\{P-P-P-R\}$ 	$\{3T-R\}$
$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix}$	$\{P-R//R-R-R\}$ 	$\{P-R(4R)//R\perp R\}$
	$\{P-R//R-R//R\}$ 	$\{R/R(4R)//R\perp R\}$
	$\{R//R//R-R//R\}$ 	$\{P(-4S-)\perp R\}$
	$\{P-P-R//R\perp R\}$ 	$\{R(-4S-)\perp R\}$
	$\{P-P-P-R\perp R\}$ 	$\{(5R)R\perp R//R\}$
	$\{P-S-S\}$ 	$\{2-(S-P-S)\}$
$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$	$\{R-S-S\}$ 	$\{2-(R-S-S)\}$
	$\{P//R//R-S\}$ 	

上述步骤(2)~(4),文献[15]已给出判定准则或计算公式,故本文不再赘述。

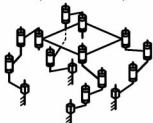
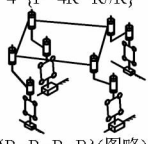
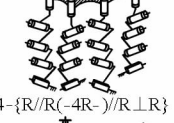
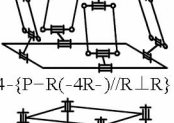
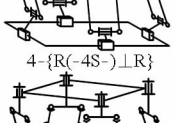
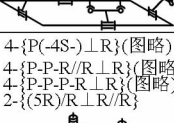
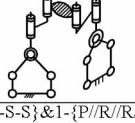
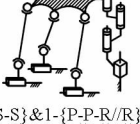
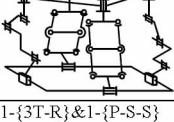
(5)分类、列表:将综合出的 3T1R 并联机构分为:A(所有支链结构类型均相同)、B(部分支链结构类型相同)、C(所有支链结构类型均不同)3 类,如表 2 所示。

1.2 机构优选

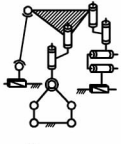
理想的 3T1R 并联操作手应满足:①结构尽可

表 2 并联机构拓扑结构

Tab.2 Topology structures of parallel mechanism

分类	编号	机构描述及简图
A(所有支链结构类型均相同)		4- {P//R//R//R}
	A1	
	A2	4- {4R-R//R//R}(图略)
	A3	4- {P-P//R//R}(图略)
		4- {P-4R-R//R}
	A4	
	A5	4- {P-P-P-R}(图略)
		4- {R//R//R-R//R}
	A6	
	A7	4- {P-R//R-R//R}(图略)
		4- {P-R//R//R}
	A8	
		4- {R//R(-4R-)//R⊥R}
	A9	
		4- {P-R(-4R-)//R⊥R}
	A10	
		4- {R(-4S-)⊥R}
	A11	
B(部分支链结构类型相同)	A12	4- {P(-4S-)⊥R}(图略)
	A13	4- {P-P-R//R⊥R}(图略)
	A14	4- {P-P-P-R⊥R}(图略)
		2- {(5R)R⊥R//R}
	A15	
		3- {P-S-S}&1- {P//R//R//R}
	B1	
	B2	3- {R-S-S}&1- {P-P-R//R}(图略)
	B3	2- {P-S-S}&2- {P//R//R//R}(图略)
	B4	2- {R-S-S}&2- {P-P-R//R}(图略)
		2- {P-R//R//R}&2- {R(4S)⊥R}
	B5	
C(所有支链结构类型均不同)		1- {3T-R}&1- {P-S-S}
	C1	
	C2	1- {P//R//R//R}&1- {P-P-R//R}&1- {R(-4S-)⊥R}&1- {P-S-S}(图略)

续表 2

分类	编号	机构描述及简图
	C3	1- {P(-4S-)⊥R}&1- {P-P-R//R}&1- {R(-4S-)⊥R}&1- {P-S-S}(图略)
	C4	1- {R-S-S}&1- {P-P-P-R}&1- {R(-4S-)⊥R}&1- {P-S-S}(图略)
		1- {(5R)R⊥R//R}&1- {P-S-S}&1- {P-R//R-R//R}
	C5	

注:对表 1 中的支路进行排列组合,可得到众多 B 类和 C 类并联机构,限于篇幅且根据后文需要,表 2 仅列出部分 B 类和 C 类机构。

能简单,且加工制造方便。②工作空间大,且具有较好的各向同性。③承载能力强,且具有较好的运动/力传递性能。根据上述 3 个要求,对综合出的并联机构进行优选。

(1)考虑对称性要求。为获得较好的各向同性,人们期望综合出全对称的机构。全对称并联机构同时满足^[19]:①可以实现连续的运动。②各支链结构相同。③所有支链对称布置在静平台上。④各支链中驱动器数目相等且安装位置相同。

表 2 中同时满足全对称 4 个条件的全对称并联机构仅 11 种(即 A3、A5、A6、⋯、A14)。以机构 A1 为例,虽然其所有支链结构相同,但由于其静平台上 4 个移动副中仅 1 个可以作为驱动副,故不满足上述全对称条件④。

(2)考虑承载及运动/力传递性能要求。机构 A3、A5、A13、A14 由于存在漂浮移动副,故力传递性能较差。机构 A9、A10、A11、A12 采用混合支链结构,故结构比机构 A6、A7、A8 要复杂,但承载能力增强。

(3)考虑工作空间等性能要求。机构 A11、A12 存在球副,而球副因结构限制转角范围有限,故在结构参数相同的情况下,机构 A9、A10 比 A11、A12 的工作空间大。机构 A9 与 A10 相比,机构 A9 具有可折叠性,便于机构不工作时收起和存放,节省空间。

综上所述,机构 A9 综合性能较优,具有良好的开发潜力。下面对其进行位置建模和求解。

2 位置分析

位置分析问题可描述为:已知机构结构参数,确定驱动副的输入量与动平台位姿之间映射关系。它是速度、加速度、动力学以及工作性能(如工作空间、灵巧度等)分析等后续研究的基础。

2.1 机构描述及坐标系的建立

如图 1 所示,并联机构的动、静平台均为正方

形,4 条支链结构类型完全相同,可描述为: $\{R_{i1} // R_{i2}(-4R-)/ / R_{i3} \perp R_{i4}\}, i=1,2,3,4$ 。其中,转动副 (R_{i2}, R_{i3}) 安置在平行四边形机构两短边杆中点上;驱动副 $(R_{i1}, R_{21}, R_{31}, R_{41})$ 安置在静平台 4 条边的中点,且它们的轴线与静平台的 4 条边重合;动平台上的转动副 $(R_{i4}, R_{24}, R_{34}, R_{44})$ 轴线相互平行且均垂直于动平台。

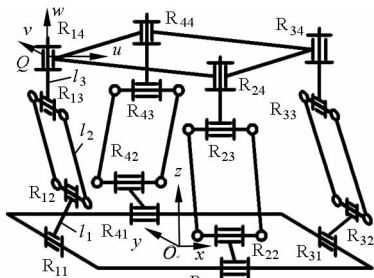


图 1 机构简图及坐标系

Fig. 1 Schematic diagram and coordinate systems

该并联机构的结构参数为:动、静平台的外接圆半径分别记为 r 和 R ;4 条相同支链中的转动副 R_{i1} 、 R_{i3} 的杆长分别记为 l_1 和 l_3 ; R_{i2} 与 R_{i3} 之间的距离记为 l_2 。上述结构参数均为常数。

为方便运动学分析,在静、动平台上分别建立静坐标系 $Oxyz$ 和动坐标系 $Quvw$ 。其中,原点 O 位于静平台的中心, x 轴与 R_{11} 和 R_{41} 的连线重合, y 轴与 R_{21} 和 R_{31} 的连线重合, z 轴为静平台所在平面的法线;原点 Q 与动平台上 R_{14} 重合, u 轴与 R_{14} 和 R_{44} 的连线重合, v 轴与 R_{24} 和 R_{34} 的连线重合, w 轴为动平台所在平面的法线。

2.2 位置逆解分析

位置逆解分析问题可描述为:已知动平台的位置(即 Q 在静坐标系中的坐标,记为 (x, y, z))和姿态(即动平台绕 z 轴转过的角度,记为 θ),确定 4 个驱动副 (R_{i1}) 的输入量 $\varphi_i (i=1,2,3,4)$ 。其分析过程如下:

(1) 根据动平台的位置,即 $Q(x, y, z)$ 和 θ ,可求得 $R_{i4} (i=1,2,3,4)$ 在静坐标系上的坐标。又由于 R_{i3} 指向 R_{i4} 的矢量为 $l_3 z$,故容易求得 R_{i3} 在静坐标系上的坐标为

$$\begin{cases} \boldsymbol{OR}_{i3} = (x, y, z - l_3) \\ \boldsymbol{OR}_{23} = \boldsymbol{OR}_{i3} + \boldsymbol{S}_1 \\ \boldsymbol{OR}_{33} = \boldsymbol{OR}_{i3} + \boldsymbol{S}_2 \\ \boldsymbol{OR}_{43} = \boldsymbol{OR}_{i3} + \boldsymbol{S}_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{S}_1 = (r \cos \theta + r \sin \theta, r \sin \theta - r \cos \theta, 0)$

$\boldsymbol{S}_2 = (2r \cos \theta, 2r \sin \theta, 0)$

$\boldsymbol{S}_3 = (r \cos \theta - r \sin \theta, r \sin \theta + r \cos \theta, 0)$

(2) $R_{i2} (i=1,2,3,4)$ 在静坐标系上的坐标,可

用 φ_i 方便地解析表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{OR}_{12} = (-R + l_1 \cos \varphi_1, 0, l_1 \sin \varphi_1) \\ \boldsymbol{OR}_{22} = (0, -R + l_1 \cos \varphi_2, l_1 \sin \varphi_2) \\ \boldsymbol{OR}_{32} = (R + l_1 \cos \varphi_3, 0, l_1 \sin \varphi_3) \\ \boldsymbol{OR}_{42} = (0, R + l_1 \cos \varphi_4, l_1 \sin \varphi_4) \end{cases} \quad (3)$$

(3) 由于 R_{i2} 与 R_{i3} 之间的距离恒为 l_2 , 故

$$|\boldsymbol{OR}_{i3} - \boldsymbol{OR}_{i2}|^2 - l_2^2 = 0 \quad (i=1,2,3,4) \quad (4)$$

(4) 将式(2)、(3)代入式(4)中,且将变量 (φ_i)

和已知量 (x, y, z, θ) 进行分离,可得

$$a_i \cos \varphi_i + b_i \sin \varphi_i + c_i = 0 \quad (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

其中

$$a_1 = -2l_1(x + R)$$

$$a_2 = -2l_1[y + R + r(\sin \theta - \cos \theta)]$$

$$a_3 = -2l_1(x - R + 2r \cos \theta)$$

$$a_4 = -2l_1[y - R + r(\sin \theta + \cos \theta)]$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = -2l_1(z - l_3)$$

$$c_1 = (x + R)^2 + y^2 + (z - l_3)^2 + l_1^2 - l_2^2$$

$$c_2 = 2r[(x - y - R) \cos \theta + (x + y + R) \sin \theta] + x^2 +$$

$$2r^2 + (y + R)^2 + (z - l_3)^2 + l_1^2 - l_2^2$$

$$c_3 = 4r[(x - R) \cos \theta + y \sin \theta] + y^2 + 4r^2 + l_1^2 -$$

$$l_2^2 + (x - R)^2 + (z - l_3)^2$$

$$c_4 = 2r[(x + y - R) \cos \theta + (y - R - x) \sin \theta] + x^2 +$$

$$2r^2 + (y - R)^2 + l_1^2 - l_2^2 + (z - l_3)^2$$

显然式(5)可解析求解,且由该式可知:每个驱动副的输入量 φ_i 均有 2 组解。因此,该机构位置逆解方程共有 $2^4(16)$ 组解。

2.3 位置正解分析

位置正解分析问题可描述为:已知结构参数和 4 个驱动副的输入量 $\varphi_i (i=1,2,3,4)$,确定动平台的位姿 (x, y, z, θ) 。

2.3.1 位置正解方程

(1) 令 $\boldsymbol{V}_i = \boldsymbol{OR}_{i3} - \boldsymbol{OR}_{i2} (i=1,2,3,4)$,对式(4)将线性简化,可得

$$\begin{cases} |\boldsymbol{V}_1|^2 = l_2^2 \\ |\boldsymbol{V}_2|^2 + |\boldsymbol{V}_4|^2 - |\boldsymbol{V}_3|^2 - |\boldsymbol{V}_1|^2 = 0 \\ |\boldsymbol{V}_3|^2 - |\boldsymbol{V}_1|^2 = 0 \\ |\boldsymbol{V}_2|^2 - |\boldsymbol{V}_4|^2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(2) 将式(2)、(3)代入式(6)中,再经换元(令 $x' = x + R - l_1 \cos \varphi_1, y' = y, z' = z - l_3 - l_1 \sin \varphi_1$),最后分离变量 (x', y', z', θ) 和已知量 (φ_i) ,可得

$$\begin{cases} (x')^2 + (y')^2 + (z')^2 - l_2^2 = 0 \\ d_1 x' + e_1 y' + f_1 z' + G_1 = 0 \\ D_2 x' + E_2 y' + f_2 z' + G_2 = 0 \\ D_3 x' - E_3 y' + f_3 z' + G_3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$G_1 = g_{11} \cos \theta + g_{12} \sin \theta + g_{13}$$
$$G_2 = g_{21} \cos \theta + g_{23}$$
$$G_3 = g_{31} \cos \theta + g_{32} \sin \theta + g_{33}$$
$$D_2 = 2r \cos \theta + d_2$$
$$E_2 = D_3 = 2r \sin \theta \quad E_3 = 2r \cos \theta + e_3$$
$$d_2 = (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_3) l_1 - 2R$$
$$e_3 = (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_4) l_1 - 2R$$
$$d_1 = \cos \varphi_1 + \cos \varphi_3 \quad e_1 = -(\cos \varphi_2 + \cos \varphi_4)$$
$$f_1 = \sin \varphi_1 + \sin \varphi_3 - \sin \varphi_2 - \sin \varphi_4$$
$$f_2 = (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_3) l_1 \quad f_3 = (\sin \varphi_4 - \sin \varphi_2) l_1$$
$$g_{11} = (2 \cos \varphi_3 + \cos \varphi_2 - \cos \varphi_4) r$$
$$g_{12} = -(\cos \varphi_2 + \cos \varphi_4) r$$
$$g_{13} = l_1 - \sin \varphi_1 (\sin \varphi_2 + \sin \varphi_4) l_1 + l_1 \cos (\varphi_1 - \varphi_3) -$$
$$(2 \cos \varphi_3 + \cos \varphi_2 - \cos \varphi_4) R$$
$$g_{21} = 2r [(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_3) l_1 - 2R]$$
$$g_{23} = 2(r^2 + R^2) + l_1^2 - \cos (\varphi_1 - \varphi_3) l_1^2 -$$
$$2(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_3) R l_1$$
$$g_{31} = (\cos \varphi_2 + \cos \varphi_4) r l_1$$
$$g_{32} = (2 \cos \varphi_1 + \cos \varphi_4 - \cos \varphi_2) r l_1$$
$$g_{33} = \sin \varphi_1 (\sin \varphi_4 - \sin \varphi_2) l_1^2 - R l_1 (\cos \varphi_2 + \cos \varphi_4)$$

(3) 对式(7)中后 3 个方程进行线性求解, 可得 (x', y', z') , 再将其代入式(7)中的第 1 个方程, 可得到关于 θ 的约束方程

$$H(\theta) = |J|^2 - l_2^2 F^2 \tag{8}$$

其中 $F = m_1 \cos \theta + m_2 \sin \theta + m_3$

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}$$

$$m_1 = 2r(f_2 d_1 - f_3 e_1 - f_1 d_2 - f_1 e_3)$$
$$m_2 = 2r(f_3 d_1 + f_2 e_1)$$
$$m_3 = f_2 d_1 e_3 - f_3 d_2 e_1 - f_1 d_2 e_3 - 4f_1 r^2$$
$$J_{11} = 2rf_2 \cos \theta + 2rf_3 \sin \theta + f_2 e_3$$
$$J_{12} = -(2rf_1 \cos \theta + f_3 e_1 + f_1 e_3)$$
$$J_{13} = -2rf_1 \sin \theta + f_2 e_1$$
$$J_{21} = -(2rf_3 \cos \theta - 2rf_2 \sin \theta + f_3 d_2)$$
$$J_{22} = -2rf_1 \sin \theta + f_3 d_1$$
$$J_{23} = 2rf_1 \cos \theta + f_1 d_2 - f_2 d_1$$
$$J_{31} = -2r(d_2 + e_3) \cos \theta - (d_2 e_3 + 4r^2)$$
$$J_{32} = 2rd_1 \cos \theta + 2re_1 \sin \theta + e_3 d_1$$
$$J_{33} = -2re_1 \cos \theta + 2rd_1 \sin \theta - e_1 d_2$$

由式(8)可知:约束方程中最高次数项为 $\cos^4 \theta$ 。若采用半角变换, 则式(8)可变为一元八次代数方程, 故该机构位置正解方程在复数域最多存在 8 组解。

2.3.2 方程求解算法

对于 5 次以上的一元高次方程, 已证实无法进行根式求解, 只能得到近似解。由于在实际应用中虚数解无实际意义, 故仅需在实数域内对正解方程采用遍历搜索法^[20], 即可求得全部实数解, 具体步骤如下:

- (1) 将搜索区间 $[0^\circ, 360^\circ]$ 等分为 N 个子区间 (本文 N 取 3 600)。对每一子区间 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$, 计算 $H(\theta_i)$ 和 $H(\theta_{i+1})$ 的值, 并判断它们是否异号, 即计算检查 $\lambda = H(\theta_i)H(\theta_{i+1})$ 的正负号。若 $\lambda < 0$, 则在子区间 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$ 内必存在某实数值可满足式(8), 用更加微小的角度增量进行搜索可得到 θ 较精确的值。
- (2) 检查全部 N 个子区间, 得到满足位置约束方程(8)的全部实数解, 从而得位置正解的全部实数解。

3 数值实例

如图 1 所示, 并联机器人机构的结构参数选为: $R = 1.2$ m, $r = 0.6$ m, $l_1 = 0.4$ m, $l_2 = 1.8$ m, $l_3 = 0.3$ m。4 个驱动副的输入量分别取为: $\varphi_1 = 20^\circ$, $\varphi_2 = 30^\circ$, $\varphi_3 = 60^\circ$, $\varphi_4 = 36^\circ$ 。

根据上述位置正解模型和方程求解算法, 利用 Matlab 软件编程计算, 可求得全部实数解, 共 4 组 (表 3)。根据逆解验证, 这 4 组解均为该机器人机构位置正解。图 2 为这 4 组解对应的装配构型图。

表 3 机构位置正解的全部实数解

Tab.3 Real solutions of forward displacement

序号	$\theta/(^\circ)$	坐标 (x, y, z)
1	9.954 1	(-0.582 4, 0.180 0, 2.211 4)
2	250.933 5	(0.380 9, 0.990 2, -0.461 8)
3	301.269 3	(-0.383 1, 0.776 3, 1.999 8)
4	349.087 5	(-0.078 2, 0.592 5, -1.090 4)

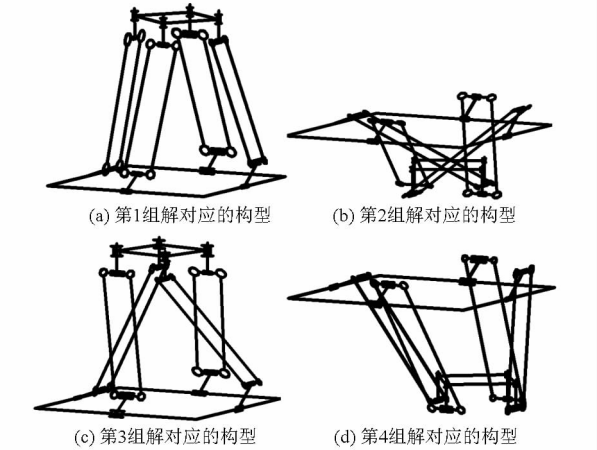


图 2 对应的装配构型图

Fig.2 Schematics of corresponding configurations

4 结论

(1)在机构设计过程中,应用本文提出的方位特征集综合-优选方法,可减少经验、灵感等人为因素。

(2)综合优选的 3T1R 并联机构具有全对称性、

可折叠性、承载能力强、工作空间大等特点,可开发应用于高速抓放、定位装配、搬运、分拣、上下料等工艺中。

(3)综合优选的 3T1R 并联机构位置逆解方程可解析求解,且最多存在 16 组解;正解方程不能解析求解,且最多存在 8 组解。

参 考 文 献

- 1 CLAVEL R. Delta: a fast robot with parallel geometry [C]//The 18th International Symposium on Industrial Robots, 1988: 91–100.
- 2 PIERROT F, COMPANY O. H4: a new family of 4-dof parallel robots [C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1999: 508–513.
- 3 赵铁石, 高英杰, 杨铁林, 等. 混合型四自由度并联平台机构及其位置分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 42–45.
- 4 ZHAO Tieshi, GAO Yingjie, YANG Tielin, et al. A novel four-dof mixed platform mechanism and its position analysis [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1): 42–45. (in Chinese)
- 5 ZLATANOV D, GOSSELIN C M. A new parallel architecture with four degrees of freedom [C]//The 2nd Workshop on Computational Kinematics, 2001: 57–66.
- 6 BRIOT S, BONEV I A. Pantopteron-4: a new 3T1R decoupled parallel manipulator for pick-and-place applications [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(5): 707–721.
- 7 ZHAO T S, DAI J S, Huang Z. Geometric analysis of overconstrained parallel manipulators with three and four degrees of freedom [J]. JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2002, 45(3): 730–740.
- 8 AMINE S, MASOULEH M T, CARO S, et al. Singularity conditions of 3T1R parallel manipulators with identical limb structures [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(1): 49–75.
- 9 LIU X J, WU C, WANG J S. A new approach for singularity analysis and closeness measurement to singularities of parallel manipulators [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(4): 61–68.
- 10 CORBEL D, GOUTTEFARDE M, COMPANY O, et al. Actuation redundancy as a way to improve the acceleration capabilities of 3T and 3T1R pick-and-place parallel manipulators [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(4): 041002–041002–13.
- 11 WANG J S, WU C, LIU X J. Performance evaluation of parallel manipulators: motion/force transmissibility and its index [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10): 1462–1476.
- 12 LIU S T, HUANG T, MEI J P, et al. Optimal design of a 4-DOF SCARA type parallel robot using dynamic performance indices and angular constraints [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(3): 0310053–0310053–10.
- 13 金琼, 杨廷力, 刘安心, 等. 基于单开链单元的三平移—转动并联机器人机构型综合及机构分类[J]. 中国机械工程, 2001, 12(9): 1038–1043.
- 14 JIN Qiong, YANG Tingli, LIU Anxin, et al. Structural synthesis and classification of the four-dof parallel robot mechanisms based on the units of single-opened-chain [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(9): 1038–1043. (in Chinese)
- 15 YU J J, LI S Z, SU H J, et al. Screw theory based methodology for the deterministic type synthesis of flexure mechanisms [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2011, 3(3): 1194–1204.
- 16 XIE F G, LIU X J. Design and development of a high-speed and high-rotation robot with four identical arms and a single platform [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(4): 041015–041015–12.
- 17 杨廷力, 刘安心, 罗玉峰, 等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 18 杨廷力, 沈惠平, 刘安心, 等. 机构自由度公式的基本形式、自由度分析及其物理内涵[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 69–80.
- 19 YANG Tingli, SHEN Huiping, LIU Anxin, et al. Review of the formulas for degrees of freedom in the past ten years [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 69–80. (in Chinese)
- 20 沈惠平, 尹洪波, 李菊, 等. 基于方位特征方法的范例并联机构的拓扑特征分析及其启示与应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 101–115.
- 21 SHEN Huiping, YIN Hongbo, LI Ju, et al. Position and orientation characteristic based method and enlightenment for topology characteristic analysis of typical parallel mechanisms and its application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 101–115. (in Chinese)
- 22 廖明, 刘安心, 沈惠平, 等. 并联机构方位特征集的符号推导方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 395–404.
- 23 LIAO Ming, LIU Anxin, SHEN Huiping, et al. Symbolic derivation of position and orientation characteristics of parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 395–404. (in Chinese)
- 24 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机型综合[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- 25 石志新, 叶梅燕, 毛志伟, 等. 5–5 型并联机器人位置正解的简单算法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 314–319.
- 26 SHI Zhixin, YE Meiyang, MAO Zhiwei, et al. Simple method for forward displacement analysis of a 5–5 in-parallel robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 314–319. (in Chinese)