

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2024.02.014

基于粒子-人工蜂群算法的 3RPUP_c-UPS 并联机构 运动学正解研究*

常振振, 张彦斌*, 张 双, 宋黎明, 李耀光
(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对 3RPUP_c-UPS 并联机构运动学正解求解困难的问题, 对新型 3RPUP_c-UPS 并联机构的运动学特性进行了研究, 并构建出位置正解求解模型, 进而提出了一种基于粒子-人工蜂群算法 (P-ABC) 的并联机构运动学求解方法。首先, 根据机构的拓扑特性, 计算得到了方位特征集、自由度和耦合度; 然后, 根据机构的几何特征, 基于姿态变换矩阵和动平台投影方程, 建立了机构的运动学逆解方程, 并对比了 MATLAB 和 SOLIDWORKS 的仿真结果, 验证了逆解分析的正确性; 最后, 将运动学逆解方程转化为最小化求解问题, 构建出了适合优化算法的运动学正解模型, 并利用 MATLAB 的软件交互界面 (GUI) 功能, 开发出用于计算并联机构运动学正解的软件, 分别基于粒子群算法 (PSO)、人工蜂群算法 (ABC) 和 P-ABC 算法, 对该并联机构的运动学正解进行了计算。研究结果表明: P-ABC 算法单次求解时间在 0.5 s 内, 求解误差级别为 10^{-20} , 相对于 ABC 算法, 运行时间缩短了 50.02%; 而相对于 POS 算法, 其求解精度提高了 10 个数量级。P-ABC 算法能够用于求解该并联机构运动学正解, 具有计算速度快、精度高的特点, 可以为研究并联机构运动学正解提供新方法。

关键词: 机构学; 并联机构; 位置正解求解模型; 方位特征集; 粒子-人工蜂群算法; 软件交互界面

中图分类号: TH112

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)02-0311-08

Forward kinematics solutions of 3RPUP_c-UPS parallel mechanism based on a particle-artificial bee colony algorithm

CHANG Zhenzhen, ZHANG Yanbin, ZHANG Shuang, SONG Liming, LI Yaoguang

(School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in solving the forward kinematics of 3RPUP_c-UPS parallel mechanism, the kinematics of a new 3RPUP_c-UPS parallel mechanism were studied, and the forward kinematics solution model was constructed, and then a kinematics solution method of parallel mechanism based on particle-artificial bee colony (P-ABC) algorithm was proposed. Firstly, according to the topological characteristics of the mechanism, the position and orientation characteristics, degrees of freedom and coupling degrees were calculated. Then, according to the geometric characteristics of the mechanism, the inverse kinematics equations were established based on the attitude transformation matrix and the projection equation of moving platform, and the correctness was verified by comparing the simulation results of MATLAB and SOLIDWORKS. Finally, the inverse kinematics equations were transformed into a minimization problem, and then a forward kinematics model suitable for optimization algorithm was constructed. The software for calculating the forward kinematics solution of the parallel mechanism was developed by using the graphic user interface (GUI) function of MATLAB, and the forward kinematics solutions were calculated based on particle swarm optimization (PSO), artificial bee colony (ABC) and P-ABC algorithm. The research results show that the solution time taken by P-ABC algorithm to solve the forward kinematics solutions is within 0.5 s, and the solution error level is 10^{-20} . Comparing with the ABC algorithm, the running time of the P-ABC algorithm is shortened 50.02%, and the accuracy of the solution is improved 10 orders of magnitude compared with the PSO algorithm. The P-ABC algorithm, which has the characteristics of fast calculation

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102210221); 河南省高等学校重点科研项目 (22A460024); 河南省科技发展计划项目 (232102220069)

作者简介: 常振振 (1998-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事机构学与并联机器人理论、康复机器人技术等方面的研究。E-mail: zzz1898@163.com

通信联系人: 张彦斌, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: yanbin_zh@163.com

speed and high precision, can be used to solve the forward kinematics of the mechanism. This work provides a new method for studying the forward kinematics of parallel mechanisms.

Key words: mechanism science; parallel mechanism; forward kinematics solution model; position and orientation characteristics (POC); particle-artificial bee colony (P-ABC) algorithm; graphic user interface (GUI)

0 引 言

并联机构具有精度高、累计误差小、承载能力强、结构紧凑等特点^[1-4],已被广泛应用于医疗康复、航空航天、工业生产等领域。但并联机构具有强运动耦合性,导致其运动学求解十分困难,阻碍了并联机构的推广应用。

运动学分析包括运动学逆解和运动学正解分析,是机构结构优化、性能分析和精确控制等理论研究的基础。相比于运动学逆解,并联机构的正解计算更为复杂,其求解方法包括解析法和数值法。常用的解析法有几何法^[5-6]、矢量代数法^[7]和四元数法^[8]等,数值法有不动点迭代法和牛顿迭代法等^[9]。

NAZARI A A 等人^[10]根据机构的几何特征,将机构的空间表达转化为平面表达,降低了运动学正解方程的复杂性。陈国旺等人^[11]通过结构降耦,得到了耦合度为 0 的机构,并采用几何方法求解了其位置正解的显式表达。

解析法虽能求取全部运动学正解,但对耦合度高的机构,其数学推导较为繁琐。HAN Xiao-guo 等人^[12]采用不动点迭代法分析了 6SPS 机构的运动学正解,并证明该方法比牛顿迭代法更有优势。强红宾等人^[13]采用调整步长牛顿法求解了 Stewart 并联机构的位置正解,解决了牛顿下山迭代法求解时间较长的问题。传统优化算法模型简单,但速度慢,且所求最优解一般与初始迭代点有关。

近年来,众多学者将智能算法应用于求解并联机构位置正解^[14-17]。常用方法有神经网络法(neural network, NN)^[18]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[19]、粒子群算法^[20]等。NN 算法性能好,但需要大量的训练样本;GA 算法具有可扩展性,容易与其他算法结合,但收敛速度慢、局部搜索能力差;PSO 算法收敛速度快,但全局寻优性差,容易陷入局部最优解。

人工蜂群算法^[21]是一种模拟自然界蜂群行为的优化算法。该算法参数设置少,对于连续函数的全局优化具有很好的搜索特性;但其后期收敛速度慢。

笔者针对新型 3RPUP_c-UPS 并联机构的运动学特性进行研究,根据机构几何特征建立位置逆解方程,并构建出位置正解求解模型;进而提出一种基于粒子-人

工蜂群算法的并联机构运动学求解方法;利用 MATLAB 的 GUI 模块开发机构运动学正解求解软件,利用算例分析,验证该算法的有效性。

1 机构的运动特性分析

1.1 机构的结构设计

新型 3RPUP_c-UPS 并联机构的结构简图如图 1 所示。

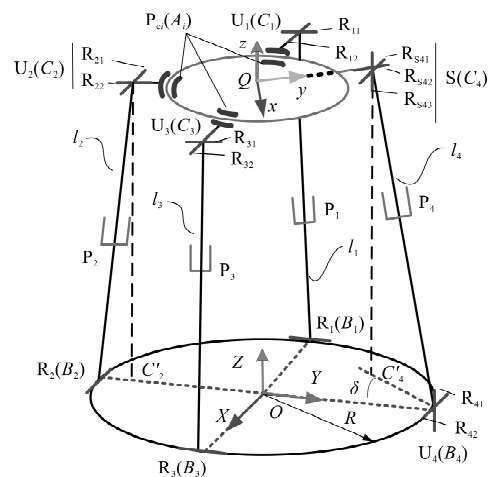


图 1 3RPUP_c-UPS 并联机构结构简图

Fig. 1 Structural diagram of 3RPUP_c-UPS parallel mechanism

由图 1 可知:动平台与定平台之间通过两种不同结构类型的支链连接。第一种支链结构类型为 RPUP_c ($L_i, i = 1 \sim 3$),由转动副 R_i 、移动副 P_i 、万向铰 U_i 和环形移动副 P_{ci} 依次串联组成,并由 P_{ci} 副和 R_i 副分别与动平台、定平台相连。

为方便表述,可以将 U_i 副用两个垂直相交的转动副 R_{i1} 和 R_{i2} 代替。其中, R_i 副的轴线与 R_{i1} 副的轴线相互平行,并垂直于 P_i 副的移动方向; R_{i2} 副的轴线在动平台平面内指向动平台圆心点 Q ,并与 P_{ci} 副的移动方向垂直。 P_{ci} 副与 U_i 副始终位于动平台平面内。

第二种支链结构类型为 UPS (L_4),由万向铰 U_4 、移动副 P_4 和球副 S 依次串联组成。将 U_4 副用两个轴线垂直相交的转动副 R_{41} 和 R_{42} 表示, S 副用三个轴线交于一点并两两垂直的转动副 R_{S41} 、 R_{S42} 和 R_{S43} 表示。 R_{41} 副的轴线垂直于定平台平面, R_{42} 副的轴线与 R_{S41} 副的轴线分别垂直于 P_4 副的移动方向, R_{S42} 副的轴线在

动平台内并指向点 Q 。

R_i 副与 U_4 副均匀分布在圆心点为 O , 半径为 R 的圆 O_R 上, R_i 副轴线与圆 O_R 相切, 且 R_2 副轴线与 R_1 副和 R_3 副轴线垂直。初始位置时, R_2 副轴线与 R_{42} 副轴线平行。

1.2 机构的自由度与耦合度分析

1.2.1 自由度计算

第一种结构类型的运动支链拓扑结构记为 $\{-R_i (\perp P_i) // R_{i1} (\perp R_{i2}) // P_{ci} -\}$, 第二种结构类型则记为 $\{-R_{41} \perp R_{42} (\perp P_4) // R_{S41} \perp R_{S42} \perp R_{S43}\}$ 。由于 P_{ci} 副的作用效果可等效为一个转动轴与动平台中心线重合的转动副 R_{ci} , 所以这两种类型支链末端构件的方位特征集^[22]¹⁷⁻²⁸ (position and orientation characteristics, POC) 分别为:

$$M_{bi} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^2 // (R_{i1}, R_{i2}) \cup r^1 // R_{ci} \end{bmatrix}, i=1 \sim 3 \quad (1)$$

$$M_{b4} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 // (R_{S41}, R_{S42}, R_{ci}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于方位特征方程求解并联机构的自由度公式为:

$$F = \sum_{k=1}^g f_k - \sum_{j=1}^v \xi_{lj} \quad (3)$$

式中: ξ_{lj} 为第 j 个独立回路的独立位移方程数, $\xi_{lj} = \dim. \{(\bigcap_{i=1}^j M_{bi}) \cup M_{b(j+1)}\}$; $\bigcap_{i=1}^j M_{bi}$ 为前 j 条支链组成的子并联机构的 POC 集; $M_{b(j+1)}$ 为第 $j+1$ 条支链末端构件的 POC 集; F 为机构自由度; f_k 为第 k 个运动副的自由度数; g 为运动副的总数; v 为独立回路数, $v = g - n + 1$, n 为构件数目。

由第 1、2 条支链构成第一个独立回路, 可得:

$$\xi_{l1} = \dim. \{M_{b1} \cup M_{b2}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = 6 \quad (4)$$

而第 1、2 条支链构成的子并联机构 PM_1 的 POC 集为:

$$M_{S(1-2)} = M_{b1} \cap M_{b2} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

PM_1 与第 3 条分支构成第 2 个回路, 则有:

$$\xi_{l2} = \dim. \{M_{S(1-2)} \cup M_{b3}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = 5 \quad (6)$$

那么, 子并联机构 PM_2 的 POC 集为:

$$M_{S(1-3)} = M_{S(1-2)} \cap M_{b3} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

同理, PM_2 与支链 4 构成第 3 个回路, 则:

$$\xi_{l3} = \dim. \{M_{S(1-3)} \cup M_{b4}\} = \dim. \left\{ \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} \right\} = 6 \quad (8)$$

因此, 并联机构的自由度和 POC 集分别为:

$$F = \sum_{k=1}^g f_k - \sum_{j=1}^v \xi_{lj} = 21 - (6 + 5 + 6) = 4 \quad (9)$$

$$M_{S(1-4)} = M_{S(1-3)} \cap M_{b4} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^1 \\ r^3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)和式(10)表明: 选取移动副 $P_i (i=1 \sim 3)$ 的线位移和 U_4 副中 R_{41} 的转轴角位移为机构的主动输入时, 该机构为四自由度三转动一移动并联机构, 对应于人体腕关节掌屈/背伸、桡偏/尺偏、旋前/旋后和沿手臂方向的拉伸四种康复训练动作, 可将其应用于腕关节康复训练机构。

1.2.2 耦合度计算

由基于序单开链 (single open chain, SOC) 的机构组成原理可知^[22]¹⁰⁷⁻¹¹⁵, 任一机构可分解为若干基本运动链, 独立回路数为 v 的基本运动链可分解为 v 个有序单开链 $SOC_i (i=1 \sim v)$, 其中, 第 j 个 SOC_j 的约束度定义为:

$$\Delta_j = \sum_{k=1}^{g_j} f_k - I_j - \xi_{lj} \quad (11)$$

式中: g_j 为第 j 个 SOC_j 的运动副数; I_j 为第 j 个 SOC_j 的驱动副数。

机构的耦合度定义为^[23]:

$$k = \frac{1}{2} \min \left\{ \sum_{j=1}^v |\Delta_j| \right\} \quad (12)$$

3RPUP_c-UPS 机构各有序单开链的约束度分别为:

$$\Delta_1 = \sum_{k=1}^{g_1} f_k - I_1 - \xi_{l1} = 10 - 2 - 6 = 2 \quad (13)$$

$$\Delta_2 = \sum_{k=1}^{g_2} f_k - I_2 - \xi_{l2} = 5 - 1 - 5 = -1 \quad (14)$$

$$\Delta_3 = \sum_{k=1}^{g_3} f_k - I_3 - \xi_{l3} = 6 - 1 - 6 = -1 \quad (15)$$

将式(13)~式(15)代入式(12), 得:

$$k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j| = \frac{1}{2} (2 + 1 + 1) = 2 \quad (16)$$

式(16)表明: 该机构的耦合度为 2, 建立其正解解析式十分复杂^[24], 而求取其数值解则相对简单。

由于运动学逆解方程是构建数值解模型的理论基础, 因此, 需要先进行机构的逆解建模分析。

2 机构的运动学逆解分析

设 A_i 点为环形移动副 P_{ci} 的中心点, C_i 点为 U_i

($i=1 \sim 3$) 副和 S 副的中心点。在动平台平面内, A_i 点与 C_i 点分别在半径为 r 的圆 Q_r 和半径为 c 的圆 Q_c 上。 B_i 点为 R_i 副和 U_4 副的中心点。

笔者以定平台几何中心点 O 为原点, 建立坐标系 $O-XYZ$, 其中, X 轴与 OB_3 重合并指向 B_3 点, Y 轴与 OB_4 重合并指向 B_4 点, Z 轴垂直定平台平面向上。坐标系 $Q-xyz$ 的坐标原点 Q 位于动平台几何中心, y 轴与 QC_4 重合并指向 C_4 点, z 轴垂直于动平台平面向上, x 轴由右手法则确定。

2.1 逆解模型的建立

设 $C_i B_i$ 的长度为 l_i , 即前 3 条支链的驱动杆长度, δ 表示转轴 R_{41} 的角位移(见图 1), 则并联机构的运动学逆解为已知动平台的位姿参数 α, β, γ 和 z , 需要求解机构主动输入线位移 l_i 和输入角位移 δ 。

动平台相对定平台的姿态变换矩阵可表示为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_z(\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\beta \\ c\alpha s\beta c\gamma - s\alpha s\gamma & -c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{R}_x(\alpha), \mathbf{R}_y(\beta), \mathbf{R}_z(\gamma)$ 为动平台绕 x, y 和 z 轴的坐标变换矩阵; $c^* = \cos^*, s^* = \sin^*$ 。

设圆 Q_c 上任一点 C_Q 在 xQy 平面内的坐标为 $(x, y, 0)$, 则圆 Q_c 在 xQy 平面内的方程为:

$$x^2 + y^2 = c^2 \quad (18)$$

点 C_Q 在坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标向量 \mathbf{C}_Q 为:

$$\mathbf{C}_Q = \mathbf{R} \mathbf{C}_Q + \mathbf{Q} \quad (19)$$

式中: \mathbf{C}_Q 为点 C_Q 在 $Q-xyz$ 中的坐标向量; \mathbf{Q} 为点 Q 在 $O-XYZ$ 中的坐标向量 $(0, 0, z)$ 。

由于动平台绕 z 轴的转动不影响圆 Q_c 在 XOY 平面投影的形状, 将 $\gamma=0$ 代入式(19), 求点 C_Q 在 XOY 平面上的投影坐标 (x_0, y_0) 为:

$$\begin{cases} x_0 = c\beta x \\ y_0 = s\alpha s\beta x + c\alpha y \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(18), 可得圆 Q_c 在 XOY 平面上投影的解析式为:

$$\left(\frac{x_0}{c\beta}\right)^2 + \left(\frac{y_0}{c\alpha} - \tan\beta x_0\right)^2 = c^2 \quad (21)$$

式中: $t^* = \tan^*$ 。

由式(21)可知, $C_i (i=1 \sim 3)$ 在 XOY 平面上的投影 $C'_i (x_{C'oi}, y_{C'oi})$ 分别为:

$$\begin{cases} x_{C'oi} = -x_{C'os} = -c \frac{c\alpha c\beta}{\sqrt{1-c^2\beta s^2\alpha}} \\ y_{C'oi} = y_{C'os} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} y_{C'oi} = -c\alpha \\ x_{C'oi} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

设 $\theta_i (i=1 \sim 3)$ 为 QC_i 与水平面的夹角, 易知 $\theta_2 = \alpha, \theta_1 = \theta_3$ 。 θ_3 的瞬时位形图如图 2 所示。

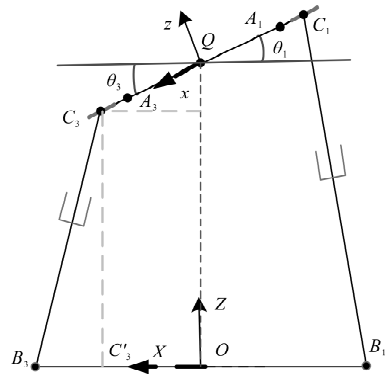


图 2 θ_3 瞬时位形

Fig. 2 Instantaneous configuration of angular θ_3

若令 $\theta_1 = \theta_3 = \theta$, 则:

$$\cos\theta = \frac{c\alpha c\beta}{\sqrt{1-c^2\beta s^2\alpha}} \quad (24)$$

根据分支伸缩杆的几何约束条件可得:

$$l_1^2 = (R - c\cos\theta)^2 + (z - c\sin\theta)^2 \quad (25)$$

$$l_2^2 = (R - c\cos\alpha)^2 + (z + c\sin\alpha)^2 \quad (26)$$

$$l_3^2 = (R - c\cos\theta)^2 + (z + c\sin\theta)^2 \quad (27)$$

而由式(19)可计算出点 $C_4(0, c, 0)$ 在定坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标, 即:

$$\begin{cases} x_{C'04} = -c\beta s\gamma \\ y_{C'04} = c(c\alpha s\gamma - s\alpha s\beta s\gamma) \\ z_{C'04} = -c(c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma) + z \end{cases} \quad (28)$$

设点 C_4 在 XOY 面上的投影点为 C'_4 (见图 1), 则向量 $\mathbf{B}_4 \mathbf{C}'_4 (x_{B_4 C'_4}, y_{B_4 C'_4})$ 与向量 $\mathbf{B}_4 \mathbf{O} (0, -R)$ 的夹角 δ 可表示为:

$$\cos\delta = \frac{\mathbf{B}_4 \mathbf{C}'_4 \cdot \mathbf{B}_4 \mathbf{O}}{|\mathbf{B}_4 \mathbf{C}'_4| |\mathbf{B}_4 \mathbf{O}|} \quad (29)$$

可计算得:

$$\delta = \arccos \frac{y_{B_4 C'_4}}{\sqrt{x_{B_4 C'_4}^2 + y_{B_4 C'_4}^2}} \quad (30)$$

式中: $x_{B_4 C'_4} = x_{C'04}; y_{B_4 C'_4} = y_{C'04} - R$ 。

2.2 逆解验证

笔者给定结构尺寸参数 $c=60 \text{ mm}, R=120 \text{ mm}$, 根据式(25)~式(27)、式(30), 利用 MATLAB 对机构逆解进行数值仿真, 并绘制各分支主动关节的运动曲线, 用虚线表示; 同时, 利用 SOLIDWORKS 进行虚拟样机建模和运动学逆解仿真, 并用点画线表示。各软件的

仿真曲线为 4 条,仿真时间 t 为 20 s。

仿真结果如图 3 所示。

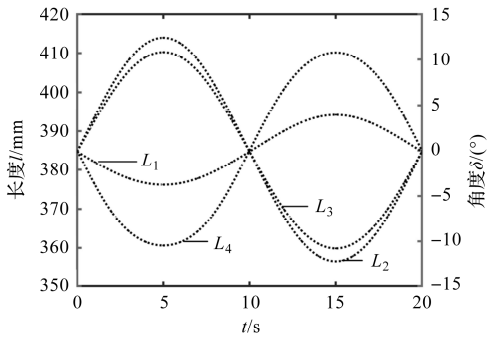


图 3 逆解仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of inverse solution

图 3 中,对比两种不同软件做出的运动仿真曲线可知;每两条曲线重合,表明仿真结果一致,验证了机构逆解理论分析的正确性。

3 基于 P-ABC 算法的正解分析

3.1 机构运动学正解模型

由于直接建立机构运动学正解的解析方程比较困难,因此,笔者根据机构主动输入线位移 l_i 和角位移 δ (用 l_4 表示 δ),求解同时满足逆解方程式 (25) ~ 式 (27) 和式 (30) 的 α, β, γ 和 z 的值,以达到运动学正解的数值求解目的。

机构的逆解方程可进一步改写为:

$$l_i - f_i(\alpha, \beta, \gamma, z) = 0 (i = 1 \sim 4) \quad (31)$$

笔者将式 (31) 转化为带约束的多目标非线性方程最小化问题,建立机构正解的求解模型,即:

$$f_{PS} = \sum_{i=1}^4 [l_i - f_i(\alpha, \beta, \gamma, z)]^2 \quad (32)$$

$$\begin{cases} -\frac{\pi}{2} \leq \alpha, \beta, \gamma \leq \frac{\pi}{2} \\ 300 \text{ mm} \leq z \leq 400 \text{ mm} \end{cases} \quad (33)$$

式中: f_{PS} 为算法的适应度,表示总体误差,其值越小,求解精度越高。

3.2 粒子-人工蜂群算法的构建

在实际应用中,并联机构快速准确的控制效果取决于运动学正解的求解精度和响应时间。笔者融合 ABC 与 PSO 算法,提出了一种基于 P-ABC 算法的并联机构运动学正解求解方法。

3.2.1 ABC 算法

ABC 算法来源于自然界蜜蜂寻找蜜源采蜜的过程,如图 4 所示。

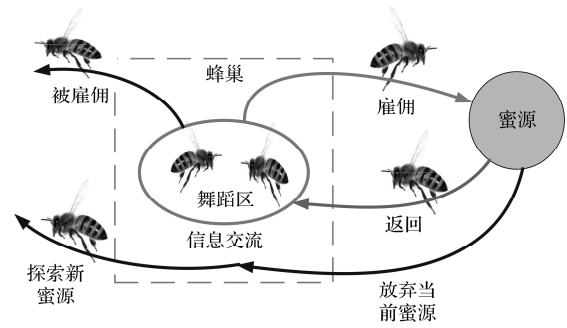


图 4 蜜蜂采蜜过程

Fig. 4 The process of bees collecting nectar

算法模型包括蜜源、引领蜂、观察蜂和侦察蜂。引领蜂发现蜜源后返回蜂巢,在舞蹈区内与观察蜂交流蜜源信息,并以一定概率雇佣观察蜂探索当前蜜源或被雇佣去探索其他蜜源,概率由蜜源的质量决定。若当前蜜源被探索完毕,引领蜂将放弃当前蜜源并转化为侦察蜂,以侦察蜂巢附近的新蜜源。

3.2.2 PSO 算法

PSO 算法来源于对鸟群觅食行为的研究,并将鸟群中的个体简化为具有位置和速度的粒子。

鸟类觅食的过程如图 5 所示。

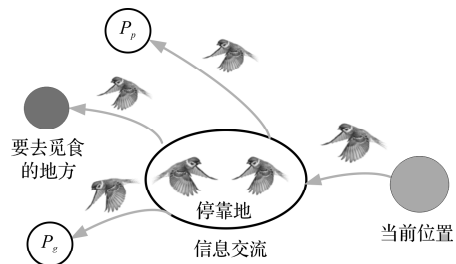


图 5 鸟类觅食过程

Fig. 5 The process of birds foraging

鸟类觅食的方向受两个因素的影响,一是自己曾经发现最多食物的地方 P_p ,二是在交流中获得的其他个体发现最多食物的地方 P_g ,最终在两者之间选择一个新方向。

3.2.3 P-ABC 算法

PSO 算法迭代速度快,但缺乏速度的动态调节,容易陷入局部最优,导致收敛精度低和不易收敛,其结果受到算法参数的影响。ABC 算法虽迭代速度较慢,但每次迭代过程中都会进行全局和局部的最优解搜索,寻找最优解的概率高。

为提高求解并联机构正解的速度和精度,笔者提出 P-ABC 算法,其可以有效克服 PSO 算法易陷入局部最优解、求解精度低、ABC 算法求解时间长的缺陷。相比于同类研究^[25],其参数设置更为简单,计算量也更小。

在该算法中,蜜源和 P_p 对应优化问题中的可能

解,其数量分别与引领蜂和粒子的数量相同,且一一对应。P-ABC 算法包含两个阶段,每个阶段都以获取 f_{PS} 最小值为正解计算结果的选择依据。

首先,在 PSO 算法中,在有 N 个粒子的 D 维搜索空间内,第 i 个粒子的位置和速度更新公式分别为:

$$X_{id}^{p+1} = X_{id}^p + V_{id}^p \quad (34)$$

$$V_{id}^{p+1} = \omega V_{id}^p + c_1 r(P_{id,pbest}^p - X_{id}^p) + c_2 r(P_{id,gbest}^p - X_{id}^p) \quad (35)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1 为个体学习因子,值越大越偏向 P_p ; c_2 为群体学习因子,值越大越偏向 P_g ; r 为 $0 \sim 1$ 的随机数; V_{id}^p 为第 i 个粒子在第 p 次迭代中第 d 维的速度向量; X_{id}^p 为第 i 个粒子在第 p 次迭代中第 d 维的位置向量; $P_{id,pbest}^p$ 为粒子目前的最优位置; $P_{id,gbest}^p$ 为群体目前的最优位置。

然后,将 PSO 算法迭代 p 次之后的最优位置 $P_{id,gbest}^p$ 作为 ABC 算法第 1 次迭代的初始位置,此时引领蜂获取的蜜源信息 M_i 为:

$$M_i = P_{i,gbest}^p = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D}\} \quad (36)$$

式中: $x_{i,j}$ 为第 i 个蜜源的第 j 维值, $i = 1 \sim N$ 。

观察蜂在舞蹈区内获取全部引领蜂的蜜源信息,并采用轮盘赌的方式选择新蜜源,其选择概率为:

$$p_i = \frac{fit_{M_i}}{\sum_{i=1}^N fit_{M_i}} \quad (37)$$

其中, fit_{M_i} 为第 i 个蜜源的适应度,其表达式为:

$$fit_{M_i} = \begin{cases} 1/(1 + f_{PSi}) & (f_{PSi} \geq 0) \\ 1 + |f_{PSi}| & (f_{PSi} < 0) \end{cases} \quad (38)$$

引领蜂在舞蹈区进行蜜源信息交流后,获得新的蜜源为:

$$x_{i,j}^{new} = x_{i,j} + \varphi_{i,j}(x_{i,j} - x_{k,j}) \quad (k \neq i) \quad (39)$$

式中: $\varphi_{i,j}$ 为区间 $[-1, 1]$ 的随机数。

引领蜂变成侦察蜂后,根据下式获取新蜜源:

$$x_{i,j} = x_j^{min} + r(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (j = 1 \sim D) \quad (40)$$

式中: r 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; x_j^{max} , x_j^{min} 为搜索范围的上边界和下边界。

每只蜜蜂可通过贪婪法比较新旧蜜源的适应度 f_{PS} , 并选择优势解作为新蜜源。算法完成设定迭代次数后,最小适应度 f_{PS} 对应的蜜源为所求最优解。

3.3 算例分析

笔者分别利用 ABC、PSO 和 P-ABC 算法对 3RPUP_c-UPS 并联机构的运动学正解进行数值求解,以验证 P-ABC 算法的优越性。

假定对三种算法设置相同的迭代次数, p 值为总迭代次数的二分之一,其余算法参数选取常用数值。

为方便运算和比较三种算法的性能,笔者使用 MATLAB 中的 GUI 模块开发出基于三种算法的机构正解求解软件,其界面如图 6 所示。

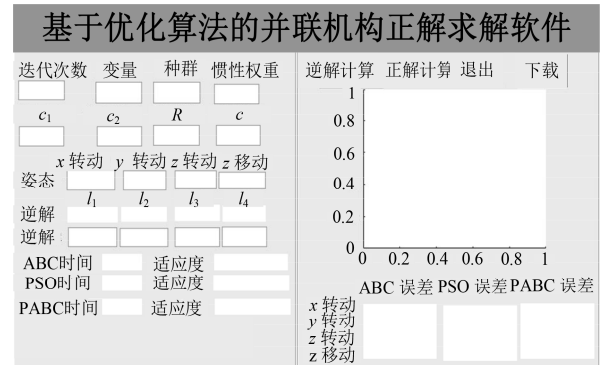


图 6 软件初始界面

Fig. 6 Initial interface of software

以求解动平台位姿 $\alpha = 25^\circ$ 、 $\beta = 34^\circ$ 、 $\gamma = 23^\circ$ 、 $z = 360$ mm 的正解为例,设机构的结构参数 $R = 120$ mm、 $c = 60$ mm;最大迭代次数取 300,群体个数取 100, $\omega = 0.8$, $c_1 = c_2 = 2$;以及运动学逆解的计算结果, $l_1 = 332.048$ mm、 $l_2 = 390.904$ mm、 $l_3 = 402.294$ mm 和 $l_4 = -14.4389^\circ$ 。

笔者将所有参数分别输入到软件界面相应的输入框内,点击正解计算,可得到三种算法的运行时间、求解误差、适应度值和适应度曲线,最后点击下载即可保存该位姿下的适应度曲线,如图 7 所示。

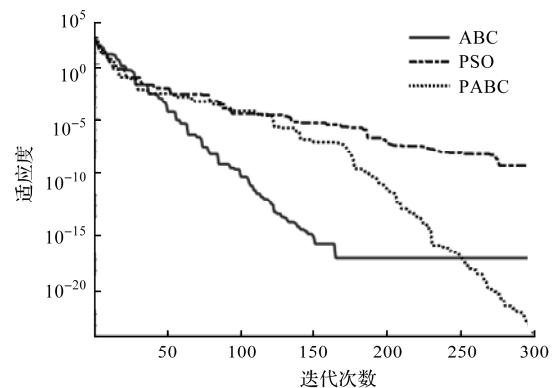


图 7 适应度曲线

Fig. 7 Fitness curves

由图 7 可知:前 150 次迭代中,ABC 算法收敛速度快于 PSO 和 P-ABC 算法的速度;150 次迭代之后,ABC 算法适应度曲线处于稳定状态,PSO 算法处于缓慢收敛状态,而 P-ABC 算法加速收敛,并偏离 PSO 算法;在 300 次迭代终止时,P-ABC 算法适应度值远小于 ABC 和 PSO 算法的值,该算法克服了 ABC 算法迭代中止和 PSO 算法求解精度低的缺陷。

软件独立运行 30 次后的误差均值如表 1 所示。

表 1 算法独立运行 30 次的误差均值
Table 1 The average error of algorithm after running 30 times independently

算法	误差均值(10^{-4})				t/s	适应度
	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	$z/(mm)$		
ABC	-3.915 5	5.284 1	0.374 4	-0.394 4	0.824 8	2.72×10^{-18}
PSO	-3.912 2	5.352 7	0.209 7	-0.419 0	0.020 85	2.81×10^{-10}
P-ABC	-3.915 6	5.284 0	0.374 5	-0.394 4	0.412 2	2.23×10^{-20}

从表 1 可知:相比于 ABC 算法,P-ABC 算法运行时间缩短了 50.02%,整体误差等级从 10^{-18} 变为 10^{-20} ;相比于 PSO 算法,其运行时间虽长,但误差等级从 10^{-10} 降至 10^{-20} ,降低了 10 个数量级。

为验证 P-ABC 算法的适用性,笔者选取 50 组不同位姿进行 300 次迭代正解求解运算,其中 5 组的计算结果如表 2 所示。

表 2 P-ABC 算法不同位姿下的运算结果
Table 2 The results of P-ABC in different attitudes

组数		参数				t/s	适应度
		$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	z/mm		
1	目标值	18	26	24	360	0.421 9	1.05×10^{-21}
	误差(10^{-4})	-5.050 6	0.560 31	-0.536 69	-2.195 87		
2	目标值	26	32	25	365	0.421 5	1.64×10^{-22}
	误差(10^{-4})	-0.706 3	0.662 75	-2.752 4	0.409 4		
3	目标值	35	40	25	380	0.436 6	1.72×10^{-24}
	误差(10^{-4})	6.088 5	-0.120 29	2.878 65	-0.935 97		
4	目标值	40	32	20	375	0.461 5	1.11×10^{-21}
	误差(10^{-4})	0.423 63	2.618 5	0.810 37	-1.627 57		
5	目标值	10	9	15	345	0.426 4	9.93×10^{-22}
	误差(10^{-4})	6.076 27	-0.382 02	0.079 93	-3.284 82		

表 2 计算结果表明:P-ABC 算法单次求解时间在 0.5 s 内,求解误差级别为 10^{-20} ,能有效满足实际应用。

优选,以获取最佳的工作性能,并将其应用于其他类型机构的运动学求解中,以验证该算法的通用性。

4 结束语

针对 3RPUP_c-UPS 并联机构运动学正解求解困难的问题,笔者分析了 3RPUP_c-UPS 并联机构的运动输出特性,并融合了 PSO 和 ABC 算法,提出了兼顾两者优点的 P-ABC 算法。

研究结论如下:

1) 分析了机构的拓扑结构和方位特征集,计算得出其自由度为 4,运动耦合度为 2,表明机构具有较强的运动学耦合性;

2) 利用机构几何特征建立了机构运动学逆解方程,推导出其解析表达式,并利用 MATLAB 和 SOLIDWORKS 软件仿真验证了逆解模型的正确性;

3) 建立了机构运动学正解的数值求解模型,将运动学正解求解转化为含有约束的多目标非线性方程的最小化问题。算例分析结果表明,P-ABC 算法不仅运算快、运行时间短,还具有求解精度高的优点。相对于 ABC 算法,P-ABC 算法的运行时间缩短了 50.02%;相对于 POS 算法,其求解精度提高了 10 个数量级。

在后续的研究工作中,笔者将对该算法参数进行

参考文献 (References):

- [1] GALLAPDO-ALVARADO J. A Gough-Stewart parallel manipulator with configurable platform and multiple end-effectors[J]. *Meccanica*,2020,55(3):597-613.
- [2] ZHU Wei, LIU Jia-hong, LI Han-bing, et al. Design and analysis of a compliant polishing manipulator with tensegrity-based parallel mechanism [J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*,2021,19(4):414-422.
- [3] 王庆峰,李虹,王新宇,等. 2-SPR/RCU 并联机构的运动性能与灵巧度分析[J]. *机械科学与技术*,2021,40(8):1177-1185.
WANG Qing-feng, LI Hong, WANG Xin-yu, et al. Analysis on kinematic performance and dexterity of 2-SPR/RCU asymmetric parallel mechanism[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40(8): 1177-1185.
- [4] 刘伟,马志广,张顺心,等. 新型绳驱动串联肘腕康复机器人运动学分析[J]. *河北工业大学学报*,2018,47(4):6-9.
LIU Wei, MA Zhi-guang, ZHANG Shun-xin, et al. Kinematics analysis on the series-parallel mechanism of a novel cable-driven elbow and wrist rehabilitation robot[J]. *Journal of Hebei University of Technology*,2018,47(4):6-9.
- [5] JAIME G A, JOSE M R-M, GUESE A. Kinematics and singularity analyses of a 4-DOF parallel manipulator using screw theory[J]. *Mechanism and Machine Theory*,2006,41(9):1048-1061.

- [6] 华耀,沈惠平,李菊,等. 1T1R 并联机构拓扑设计及其运动学、动力学分析[J]. 机电工程,2022,39(10):1424-1432.
HUA Yao, SHEN Hui-ping, LI Ju, et al. Topological design, kinematic and dynamics performance analysis of 1T1R parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2022,39(10):1424-1432.
- [7] 马春生,汪辉,李瑞琴,等. 一种 3-RRS 并联机构位置分析的代数消元法[J]. 机械设计与研究,2016,32(4):5-9.
MA Chun-sheng, WANG Hui, LI Rui-qin, et al. Position analysis of a kind of 3-RRS parallel mechanism based on algebraic elimination method [J]. Machine Design & Research,2016,32(4):5-9.
- [8] 赵德胜,吴荣军,张雪. 基于四元数的 6-UPS 机构奇异性分析[J]. 机械传动,2015,39(2):72-76.
ZHAO De-sheng, WU Rong-jun, ZHANG Xue. Singularity analysis of 6-UPS mechanism based on quaternion [J]. Journal of Mechanism Transmission,2015,39(2):72-76.
- [9] 陆金鑫,王汝贵,陈培民,等. 基于牛顿迭代法的并联机床运动学分析[J]. 机械设计与研究,2022,38(1):114-117,127.
LU Jin-xin, WANG Ru-gui, CHEN Pei-min, et al. Kinematic analysis of parallel machine tool based on Newton iteration method[J]. Machine Design & Research,2022,38(1):114-117,127.
- [10] NAZARI A A, AYYUB H, MAJID B. Screw theory-based mobility analysis and projection-based kinematic modeling of a 3-CRRR parallel manipulator [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018,40(7):1-15.
- [11] 陈国旺,车林仙,杜力,等. PS-3SPS 结构降耦并联机构运动学分析[J]. 机械设计,2019,36(8):72-79.
CHEN Guo-wang, CHE Lin-xian, DU Li, et al. Kinematic analysis on the PS-3SPS parallel mechanism with the decoupling-reducing[J]. Journal of Machine Design,2019,36(8):72-79.
- [12] HAN Xian-guo, ZHANG Jun. A method to get the forward kinematics of parallel kinematics mechanisms based on the fixed-point iteration [J]. Advanced Materials Research, 2013,753-755(8):2949-2953.
- [13] 强红宾,王力航,姜雪,等. 基于调整步长牛顿法的 Stewart 并联机构位置正解[J]. 光学精密工程,2018,26(12):2982-2990.
QIANG Hong-bin, WANG Li-hang, JIANG Xue, et al. Forward kinematic of stewart parallel manipulator based on step-adjusting Newton method [J]. Optics and Precision Engineering,2018,26(12):2982-2990.
- [14] 张良安,万俊,谭玉良. Ahut-Delta 并联机构改进混沌粒子群算法尺度综合[J]. 农业机械学报,2015,46(8):344-351.
ZHANG Liang-an, WAN Jun, TAN Yu-liang. Dimensional synthesis of Ahut-Delta parallel mechanism based on improved chaotic particle swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):344-351.
- [15] ZHANG Hai-qiang, FANG Hai-rong, JIANG Bing-shan, et al. A Newton-Raphson and BP Neural Network Hybrid Algorithm for Forward Kinematics of Parallel Manipulator [C]//2019 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation(WRC SARA). Beijing: IEEE, 2019:122-127.
- [16] WU Shen-li, LIANG Xiao-ming, LIU Ling, et al. Bacterial foraging optimization algorithm based on normal cloud model for forward kinematics of a 4-DOF parallel manipulator[J]. Ferroelectrics,2022,594(1):175-188.
- [17] GHORBANI L, OMURLU V E. Forward Kinematics of a 6x6 UPU Parallel Mechanism by ANFIS Method[C]//2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology(CEIT). Turkey: IEEE, 2018:1-6.
- [18] TAVASSOLIAN F, KHOTANLOU H, VARSHOVI-JAGHARGH P. Forward kinematic analysis of spatial parallel robots using a parallel evolutionary neural network [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering,2022,47(3):1079-1092.
- [19] WANG Xue-song, HAO Ming-lin, CHENG Yu-hu. On the use of differential evolution for forward kinematics of parallel manipulators [J]. Applied Mathematics and Computation,2008,205(2):760-769.
- [20] ZHANG Shu-zhen, YUAN Xiao-long, DOCHERTY P D, et al. An improved particle swarm optimization algorithm and its application in solving forward kinematics of a 3-DOF parallel manipulator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2021,235(5):896-907.
- [21] GAO Wei-feng, LIU San-yang. A modified artificial bee colony algorithm [J]. Computers & Operations Research, 2012,39(3):687-697.
- [22] 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.
YANG Ting-li, LIU An-xin, LUO Yu-feng, et al. Theory and Application of Robot Mechanism Topology [M]. Beijing: Science Press,2012.
- [23] 孙艳霞,陈燕飞,金小俊,等. 名优绿茶智能化采摘关键技术研究进展[J]. 包装与食品机械,2022,40(3):100-106.
SUN Yan-xia, CHEN Yan-fei, JIN Xiao-jun, et al. Review on key technologies of intelligent plucking of high-quality green tea [J]. Packaging and Food Machinery, 2022,40(3):100-106.
- [24] 沈惠平,朱小蓉,尹洪波,等. 并联机构的结构降耦原理及其设计方法[J]. 机械工程学报,2016,52(23):102-113.
SHEN Hui-ping, ZHU Xiao-rong, YIN Hong-bo, et al. Principle and design method for structure coupling-reducing of parallel mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(23):102-113.
- [25] 王继超,李擎,崔家瑞,等. 一种改进的人工蜂群算法——粒子蜂群算法[J]. 工程科学学报,2018,40(7):871-881.
WANG Ji-chao, LI Qing, CUI Jia-rui, et al. An improved artificial bee colony algorithm—particle bee colony [J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(7):871-881.

本文引用格式:

常振振,张彦斌,张双,等. 基于粒子-人工蜂群算法的 3RPUP_c-UPS 并联机构运动学正解研究[J]. 机电工程,2024,40(2):311-318.

CHANG Zhenzhen, ZHANG Yanbin, ZHANG Shuang, et al. Forward kinematics solutions of 3RPUP_c-UPS parallel mechanism based on a particle-artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024,40(2):311-318.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>