

一种新型三自由度力控末端执行器及其运动学和性能分析

张林^{1,2,3}, 杨桂林^{2,3}, 刘立涛^{1,2,3}, 李建钢^{2,3}, 柳丽^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;
3. 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: 提出了一种安装在工业机器人末端具有3个平动自由度的力控末端执行器, 适用于工件狭小空间处的自动化打磨抛光. 该执行器采用了3-PPaR 并联机构构型, 实现了紧凑对称的结构设计. 为了提高执行器的定位精度和力控性能, 采用了3个音圈电机驱动. 首先, 通过修正的G-K公式验证了机构的自由度, 进行了机构运动学正逆解的分析; 其次, 建立了机构的雅可比矩阵, 讨论了机构的奇异性; 最后, 利用数值法分析了机构的可达工作空间. 研究成果为该执行器机构优化设计和样机研制提供了理论基础.

关键词: 力控末端执行器; 并联机构; 自由度; 运动学; 奇异性

中图分类号: TH112; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 01-0038-06

传统的手工打磨抛光, 效率低、耗时长、劳动强度大, 工件表面抛光质量在很大程度上依赖于技术工人的经验和熟练程度. 采用工业机器人进行自动化抛光, 可以提高打磨抛光质量和效率. 为了实现工件表面打磨、抛光和去毛刺等连续接触式加工, 工业机器人在打磨抛光时, 需要控制工具头与工件间的接触力. 目前用于抛光的工业机器人对工件进行打磨抛光时主要采用2种方式来实现加工过程中力控制^[1]: 一种是直接通过控制工业机器人关节力矩来实现力控制; 另一种是在工业机器人末端安装力控末端执行器间接实现力控制. 通过力控末端执行器来调整工件打磨抛光时的接触力具有控制精度高、动态响应好等优点, 因而力控末端执行器的研究具有重要的意义.

美国德州PushCorp公司设计出AFD系列轴向柔顺力控制机构^[2]; 奥地利FerRobotics公司设计出轴向柔顺力控装置^[3]; 赵亚平等^[4]提出了一种气电混合单自由度力控末端执行器; 黄婷等^[5]提出了一种气缸驱动式单自由度力控末端执行器. 由于商业生产和目前研究的力控末端执行器只具有一个自由度, 灵活性较差. 为了提高力控末端执行器

的灵活性, Ma等^[6]提出了一种基于3-PPS 并联机构的三自由度力控末端执行器, 该执行器通过绕 x 、 y 轴转动可以适用复杂曲面的曲率变化, 沿着 z 轴移动可以调整轴向的接触力; 缺点是难于实现侧向力的控制, 对于具有狭小孔洞工件的内表面加工不适用.

并联机构^[7]具有承载能力强、刚度大、精度高和速度快等优点. 在少自由度并联机构中3个平动自由度并联机构一直是研究的热点, 此类机构在高速分拣机器人、工业加工设备和医疗装备等领域已得到了广泛的应用. Clavel^[8]发明的Delta机构是3T 并联机构中典型结构, 由转动关节驱动, 可以实现很高的速度和加速度, 但其结构刚度低, 承载能力弱. Li等^[9]提出了一种新型3-PRC 并联机构, 并对其进行了运动学及性能的分析, 提出了通过适当的结构设计参数消除所有奇异点的方法. Zeng等^[10]提出了一种Tri-pyramid机构, 该机构具有运动解耦, 工作空间内无奇异点等优点, 但为了使机构具有各向同性的性能, 3个主动关节采用正交布置, 致使结构不够紧凑.

本文提出一种新型3-PPaR 并联机构, 该机构

收稿日期: 2018-07-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: NSFC-浙江两化融合联合基金(U1509202); 中科院STS项目(STS-ZJ-2016ZX01); 宁波市国际合作项目(2017D10023).

第一作者: 张林(1991-), 男, 安徽宿州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 工业工程、机构设计与分析. E-mail: linzhang@nimte.ac.cn

*通信作者: 柳丽(1968-), 女, 甘肃民勤人, 副教授, 主要研究方向: 工业工程、机构设计与分析. E-mail: liuli@nbu.edu.cn

具有 3 个平动自由度, 并具有结构紧凑、高刚度、高精度、运动学正逆解简单和工作空间大, 且内部无奇异点等优点, 将其用于力控末端执行器设计, 可通过沿 x 、 y 轴方向的平动来实现侧向力的控制, 解决工件狭小空间处的自动化打磨抛光问题; 同时可以通过沿 z 轴方向的平动进行轴向力控制, 且可以满足大型工件表面的打磨抛光要求。

1 三自由度力控末端执行器结构

1.1 结构设计

力控末端执行器由力传感器、电主轴、抛光头、动平台、定平台和呈空间对称的 3 条相同支链组成 (图 1 和图 2)。3 个主动副 P 垂直固定在定平台上, 采用音圈电机驱动, 每条支链都含有通过 2 个球副 S 和 2 个转动副 R 构成的平行四边形机构, 其输入部分与主动副 P 连接, 输出杆通过转动副 R 与动平台相连, 3 个平行四边形机构呈星型布置。音圈电机往复直线运动通过支链带动动平台运动, 由于支链布置的特点, 动平台仅具有 3 个自由度, 即沿着 x 、 y 、 z 三个方向平动。

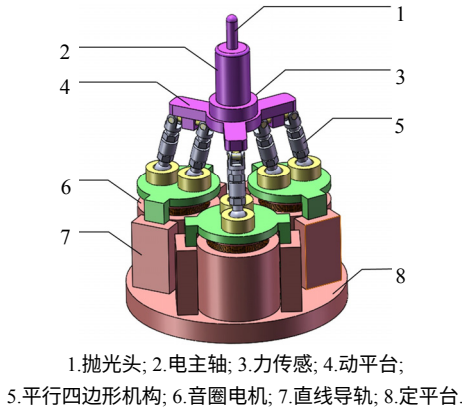


图 1 三自由度力控末端执行器结构模型

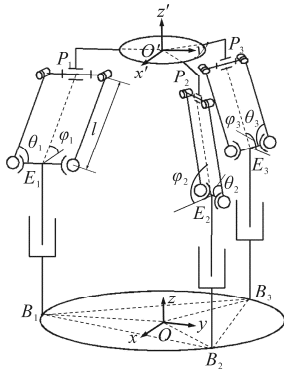


图 2 3-PPaR 并联机构简图

定坐标系的原点在定平台中心, y 轴在 B_1O 的连线上, 方向背离 B_1 点; z 轴垂直定平台, 方向向上; x 轴方向通过右手定则确定。动坐标系 $P: O'-x'y'z'$ 的原点在动平台的中心, 坐标轴的方向始终与定坐标系坐标轴方向一致。 B_i 为音圈电机的中心点; E_i 为两球副连线中点; P_i 为输出杆的中点; q_i 表示音圈电机的行程; l 表示平行四边形机构的杆长; R 表示定平台中心 O 到音圈电机中心 B_i 的距离; r 表示动平台中心 O' 到 P_i 点的距离; E_iP_i 表示等效杆; $\alpha_i = 2\pi(i-1)/3$ 表示 OB_i 与 y 轴负半轴之间的夹角, 其中 i 表示支链的数目。

1.2 自由度分析

该机构含有平行四边形闭环子链(2-SR), 为了分析机构自由度, 将其闭环子链看作是一个多自由度的广义运动副, 等效成由多个单自由度运动副串联。在定坐标系 $B: O-xyz$ 中分析平行四边形闭环子链, 发现该闭环子链可等效一个转动副 R 和一个移动副 P 串联, 支链 i 的运动螺旋可表示为:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{i1} &= (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1), \\ \mathcal{S}_{i2} &= (a_{i2} \ b_{i2} \ 0; \ d_{i2} \ e_{i2} \ 0), \\ \mathcal{S}_{i3} &= (0 \ 0 \ 0; \ d_{i3} \ e_{i3} \ f_{i3}), \\ \mathcal{S}_{i4} &= (a_{i4} \ b_{i4} \ 0; \ d_{i4} \ e_{i4} \ 0), \\ i &= 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathcal{S}_{i1}$ 表示第 i 个支链的移动副 P 的运动螺旋; $\mathcal{S}_{i2}$ 和 $\mathcal{S}_{i3}$ 表示第 i 个支链的 2-SR 平行四边形机构的等效运动螺旋; $\mathcal{S}_{i4}$ 表示第 i 个支链的转动副 R 的运动螺旋。

$$\begin{aligned} a_{i2} &= a_{i4} = -s\alpha_i, \ d_{i2} = -q_i c\alpha_i, \\ b_{i2} &= b_{i4} = c\alpha_i, \ d_{i3} = s\alpha_i \theta_i, \\ e_{i2} &= -q_i s\alpha_i, \ d_{i4} = -(l_i s\theta_i + q_i) c\alpha_i, \\ e_{i3} &= -c\alpha_i s\theta_i, \ e_{i4} = -(l_i s\theta_i + q_i) s\alpha_i, \\ f_{i3} &= c\theta_i, \\ \alpha_i &= 2\pi(i-1)/3, \ i = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

其中: s 表示 $\sin$; c 表示 $\cos$ 。下同。

对式(1)的运动螺旋系求其反螺旋得:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{i1}^r &= (0 \ 0 \ 0; \ c\alpha_i \ 0 \ s\alpha_i), \\ \mathcal{S}_{i2}^r &= (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1), \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)中由 3 条支链构成的约束螺旋系求二

次反螺旋, 得到动平台的运动螺旋系为:

$$\begin{aligned}\mathfrak{S}_1 &= (0 \ 0 \ 0; \ 1 \ 0 \ 0), \\ \mathfrak{S}_2 &= (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0), \\ \mathfrak{S}_3 &= (0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1),\end{aligned}\quad (3)$$

式(3)中的 3 个运动螺旋表示动平台沿 x 、 y 、 z 轴方向的平动自由度.

采用修正的 G-K 公式^[11]计算机构的自由度:

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta, \quad (4)$$

式中: F 为机构自由度; d 为机构的阶数; $d=6-\lambda$, λ 为公共约束数; n 为包括机架的构件数目; g 为运动副的数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度数; v 为冗余约束; ζ 为机构中约束存在的局部自由度数.

通过式(2)可知, 公共约束 $\lambda=1$, 冗余约束 $v=1$. 根据式(4)计算, 该机构的自由度为:

$$F = 5 \times (11 - 12 - 1) + 12 + 1 = 3. \quad (5)$$

综上所述, 该机构只具有三维空间平动, 即沿 x 、 y 、 z 轴的平动自由度.

2 位置分析

2.1 位置反解

并联机构的位置反解是已知机构的动平台的位置和姿态, 求解主动关节的输入值.

设动坐标中心点 O 在 $B: O-xyz$ 中的位置矢量为 $[x, y, z]^T$ (图 2), 点 P_i 在定坐标系 $B: O-xyz$ 中的位置矢量为:

$${}^B P_i = [x + r s \alpha_i \quad y - r c \alpha_i \quad z]^T, \quad i=1, 2, 3. \quad (6)$$

点 E_i 在定坐标系 $B: O-xyz$ 中的位置矢量为:

$${}^B E_i = [R s \alpha_i \quad -R c \alpha_i \quad q_i]^T, \quad i=1, 2, 3, \quad (7)$$

式中:

$$\alpha_i = 2\pi(i-1)/3, \quad i=1, 2, 3.$$

根据 $|P_i E_i| = l$, 可以得到位置约束关系为:

$$X_i^2 + Y_i^2 + (z - q_i)^2 = l^2, \quad i=1, 2, 3. \quad (8)$$

从而求出位置反解为:

$$q_i = z \pm \sqrt{l^2 - X_i^2 - Y_i^2}, \quad i=1, 2, 3, \quad (9)$$

式中:

$$X_i = x + (r - R) s \alpha_i, \quad Y_i = y + (R - r) c \alpha_i,$$

$$\alpha_i = 2\pi(i-1)/3, \quad i=1, 2, 3.$$

2.2 位置正解

并联机构的位置正解是已知机构主动关节的输入值, 求解动平台的位置和姿态.

由式(8)消元解方程组得:

$$\begin{aligned}x &= A_1(-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC})/(2A) + B_1, \\ y &= A_2(-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC})/(2A) + B_2, \\ z &= (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC})/(2A),\end{aligned}\quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned}A_1 &= (q_3 - q_2)/(\sqrt{3}(R - r)), \\ B_1 &= (q_2^2 - q_3^2)/(2\sqrt{3}(R - r)), \\ A_2 &= (-2q_1 + q_2 + q_3)/(3(r - R)), \\ B_2 &= (2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)/(6(r - R)), \\ A &= A_1^2 + A_2^2 + 1, \\ B &= 2A_2(R - r) - 2q_1 + 2A_1B_1 + 2A_2B_2, \\ C &= B_1^2 + B_2^2 + q_1^2 + r^2 - 2rR + R^2 - L^2 + 2B_2(R - r).\end{aligned}$$

3 速度分析

并联机构的速度分析通过建立主动关节的输入速度和末端输出速度之间的关系实现, 其中速度雅可比矩阵是深入分析并联机构性能的基础.

由图 2 可知, 在定坐标系 $B: O-xyz$ 中, 动平台中心点 O' 位置矢量可由支链 i 表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} l s \theta_i c \varphi_i \\ r - R + l c \theta_i \\ q_i + l s \theta_i s \varphi_i \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, 3, \quad (11)$$

式中:

$$R_z = \begin{bmatrix} c \alpha_i & -s \alpha_i & 0 \\ s \alpha_i & c \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\alpha_i = 2\pi(i-1)/3, \quad i=1, 2, 3.$$

将式(11)关于时间求导可得:

$$\mathbf{v} = \mathbf{a}_i \dot{\theta}_i + \mathbf{b}_i \dot{\varphi}_i + c \dot{q}_i, \quad i=1, 2, 3, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为机构动平台速度矢量.

$$\mathbf{v} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T,$$

$$\mathbf{a}_i = R_z [l c \theta_i c \varphi_i \quad -l s \theta_i \quad l c \theta_i s \varphi_i]^T,$$

$$\mathbf{b}_i = R_z [l s \theta_i s \varphi_i \quad 0 \quad -l s \theta_i c \varphi_i]^T,$$

$$\mathbf{c} = [0 \quad 0 \quad 1]^T,$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\alpha_i = 2\pi(i-1)/3, \quad i=1,2,3.$$

由图2可知, 等效杆 E_iP_i 的单位向量为:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{R}_z [c\varphi_i s\theta_i \quad c\theta_i \quad s\varphi_i s\theta_i]^T, \quad i=1,2,3, \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中:

$$\alpha_i = 2\pi(i-1)/3, \quad i=1,2,3.$$

对式(12)等号两边同时点乘式(13)可得:

$$\mathbf{d}_i^T \mathbf{v} = \mathbf{d}_i^T \mathbf{c} \dot{\mathbf{q}}_i, \quad i=1,2,3. \quad (14)$$

将式(14)整理成矩阵形式为:

$$\mathbf{J}_{\text{dir}} \mathbf{v} = \mathbf{J}_{\text{inv}} \dot{\mathbf{q}}, \quad (15)$$

式中: $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3)^T$; $\dot{\mathbf{q}}$ 为主动关节的速度矢量; $\mathbf{J}_{\text{dir}}$ 和 $\mathbf{J}_{\text{inv}}$ 分别为机构的正、逆雅可比矩阵.

$$\mathbf{J}_{\text{dir}} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1^T \\ \mathbf{d}_2^T \\ \mathbf{d}_3^T \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}, \quad (16)$$

$$\mathbf{J}_{\text{inv}} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1^T \mathbf{c} & & \\ & \mathbf{d}_2^T \mathbf{c} & \\ & & \mathbf{d}_3^T \mathbf{c} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}. \quad (17)$$

4 奇异性分析

在并联机构中, 由于奇异位形将会导致机构自由度的变化, 在工作空间内机构不能达到某些位置或者机构没有承载力, 影响机构运动的连续性和工作能力. 根据正逆雅可比矩阵行列式是否为零, 可以把奇异分为3类: 逆向奇异、正向奇异和混合奇异.

4.1 逆向奇异

当 $|\mathbf{J}_{\text{inv}}| = 0$, $|\mathbf{J}_{\text{dir}}| \neq 0$ 时, 机构发生逆向奇异, 此时动平台失去一个或多个自由度, 这意味着当驱动副在没有受到任何力矩和力的情况下, 动平台可以承受一个或多个力或力偶.

由式(16)和(17)可知, 当 $\mathbf{d}_i^T \mathbf{c} = 0$, 且 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ 线性无关时, 发生逆向奇异, 如图3(a)所示. 等效杆 E_1P_1 平行于定平台, 等效杆 E_2P_2 和 E_3P_3 空间相交于一点, 此时发生逆向奇异.

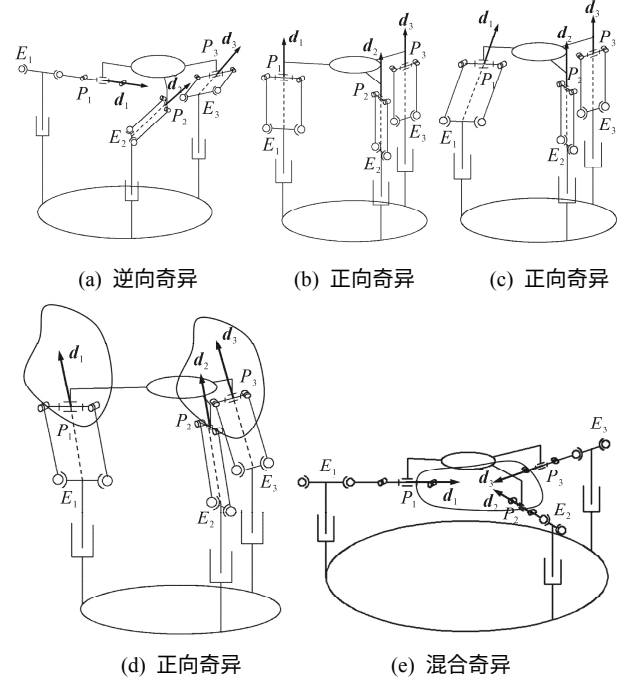


图3 3-PPaR 并联机构奇异位型

4.2 正向奇异

当 $|\mathbf{J}_{\text{dir}}| = 0$, $|\mathbf{J}_{\text{inv}}| \neq 0$ 时, 机构发生正向奇异, 此时动平台得到一个或多个自由度, 这意味着当驱动副都被锁定时, 动平台不能承受一个或多个力或力偶, 即动平台会发生运动. 机构发生正向奇异有以下3种情况:

(1) 当 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ 平行于 z 轴, 如图3(b)所示, 等效杆 E_1P_1, E_2P_2, E_3P_3 垂直于定平台, 此时机构发生正向奇异.

(2) 当 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ 其中任意两个向量平行于 z 轴, 如图3(c)所示, 等效杆 E_2P_2 和 E_3P_3 垂直于定平台, 此时机构发生正向奇异.

(3) 当 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ 其中的1个向量平行于其他2个向量所在的平面, 如图3(d)所示, 等效杆 E_1P_1 平行于等效杆 E_2P_2 和 E_3P_3 所在的平面, 此时机构发生正向奇异.

4.3 混合奇异

当 $|\mathbf{J}_{\text{dir}}| = 0$, $|\mathbf{J}_{\text{inv}}| = 0$ 时, 机构发生混合奇异, 此时所有的驱动副都被锁住, 分支可承受一个有限

运动,同时当驱动副在发生一个有限运动时而动平台不发生运动。

由式(16)和(17)可知,当 $d_i^T c = 0$,且 d_1, d_2, d_3 线性相关时,发生混合奇异,如图3(e)所示,等效杆 E_1P_1, E_2P_2, E_3P_3 平行于定平台,此时机构发生混合奇异。

综上所述,若在机构尺寸设计时,使得定平台半径大于动平台半径,以及考虑到球铰链的最大转角限制,机构将不存在奇异位型。

5 工作空间分析

一个机构性能的优劣主要取决于机构工作空间的大小和形状。如果并联机构的工作空间较小,且形状不规则,将会很大程度上限制其应用,所以对其工作空间进行分析十分重要。为了更好地满足打磨抛光要求,3-PPaR 并联机构需要具有大且规则的工作空间。通过极限边界搜索法确定可达工作空间,搜索流程如图4所示。

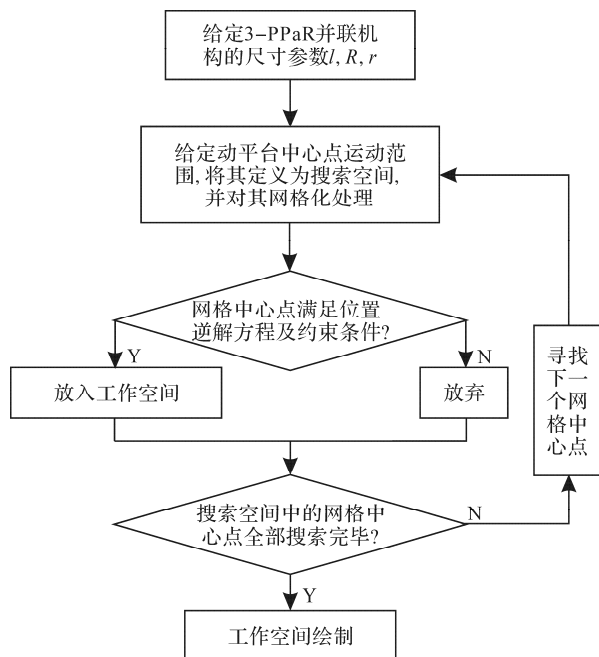


图4 3-PPaR 并联机构工作空间搜索流程图

为了更形象地了解3-PPaR 并联机构的工作空间,用如图4所示的工作空间搜索方法,给出一组算例。设该机构的设计参数为 $R=46\text{ mm}$, $r=40\text{ mm}$, $l=45\text{ mm}$, 音圈电机的行程为 25 mm 。3-PPaR 并联机构在运动过程中,由于球铰链会先发生机械干涉,因此在分析运动副转角的限制时,要以球铰链

的限制作为约束条件,即

$$0 < \gamma_i < 45^\circ, \quad \gamma_i = \arccos[(z - q_i)/l], \quad (18)$$

式中: $\gamma_i(i=1,2,3)$ 表示杆 l 与 z 轴方向之间的夹角。

所得到的机构可达工作空间,如图5所示。从图5(a)和(b)可以看出,该工作空间是一个形状比较规则的立体区域,由上下两部分组成,上部分近似圆锥,下部分近似圆柱,动平台中心点沿 x, y 轴方向最大运动范围为 $-25\sim 25\text{ mm}$,沿 z 轴方向最大运动的范围为 $0\sim 30\text{ mm}$,主要取决于音圈电机的行程,行程越大工作空间越大。图5(c)和(d)为沿 z 轴方向取得的截面图,呈 120° 中心对称,这符合3条相同支链对称布置的特点。从图5(c)和(d)可知,该机构可达工作空间内无空洞。

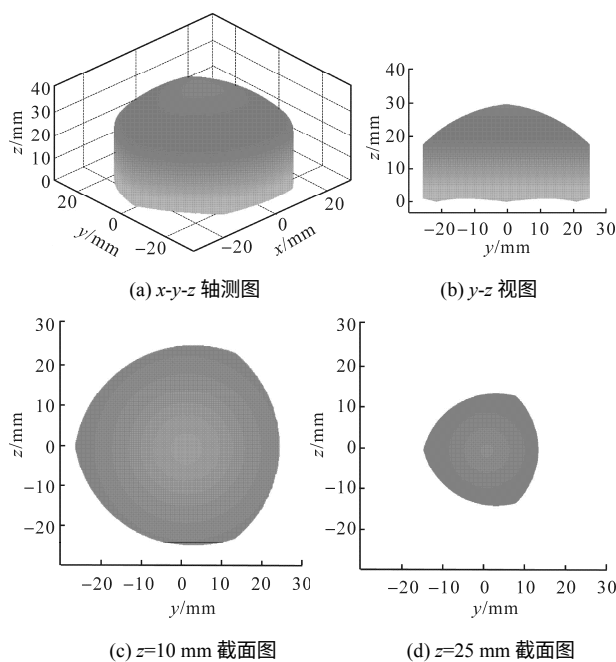


图5 3-PPaR 并联机构工作空间

6 结论

提出了一种可以实现3个平动自由度的力控末端执行器,该执行器具有结构紧凑、定位精度高和刚度大等优点,主要适用于工件狭小空间处的自动化打磨抛光。以3-PPaR 并联机构作为研究对象,对其进行运动学及性能分析。结果显示,当 $R > r$ 时,机构不存在奇异位型,在给定的行程范围内和球铰链的约束条件下,该机构在可达工作空间内无空洞。研究成果为该执行器机构优化设计

和样机制造提供了理论基础.

参考文献:

- [1] 杨桂林. 工业机器人运用技术[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6):785-792.
- [2] Edwin A. Method for applying constant force with nonlinear feedback control and constant force device using same: USA, US005448146A[P]. 1995-09-09.
- [3] Ronald N. Active handling apparatus and method for contact tasks: USA, US20140005831[P]. 2014-01-02.
- [4] 赵亚平, 杨桂林, 杨巍, 等. 气电混合式机器人力控末端执行器研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(12): 103-106.
- [5] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J]. 机器人, 2017, 39(6):776-785.
- [6] Ma K, Yang G. Kinematic design of a 3-DOF force-controlled end-effector module[C]//Industrial Electronics and Applications, IEEE, 2016:1084-1089.
- [7] Merlet J P. Parallel robots[J]. Solid Mechanics & Its Applications, 2010, 128:2091-2127.
- [8] Clavel R. Device for the movement and positioning of an element in space: USA, US4976582[P]. 1990-12-11.
- [9] Li Y, Xu Q. Kinematic analysis and design of a new 3-DOF translational parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(4):729-737.
- [10] Zeng Q, Ehmann K F, Cao J. Tri-pyramid robot: Design and kinematic analysis of a 3-DOF translational parallel manipulator[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2014, 30(6):648-657.
- [11] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014:111-117.

A novel 3-DOF force-controlled end-effector and its kinematics and performance analysis

ZHANG Lin^{1,2,3}, YANG Gui-lin^{2,3}, LIU Li-tao^{1,2,3}, LI Jian-gang^{2,3}, LIU li^{1*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

3.Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment Technology of Zhejiang Province, Ningbo 315201, China)

Abstract: A three-degree-of-freedom (3-DOF) force-controlled end-effector to realize three translations is proposed. It can be attached to an industrial robot to perform force-controlled polishing task in a narrow space. A 3-PPaR parallel robot configuration is selected for achieving compact and symmetrical structure design. In order to improve high positioning accuracy and high force-controlled performance, the end-effector is driven by three voice coil motors. Firstly, the mobility of the 3-PPaR parallel mechanism is verified by the modified G-K formula, the forward and inverse solution of the mechanism is analyzed by position constraint equation. Secondly, the Jacobian matrix is employed to determine the singularity configuration of the mechanism and the workspace is analyzed by a numerical approach. This research work provides theoretical foundation for the design optimization and prototype development of the force-controlled end-effector.

Key words: force-controlled end-effector; parallel mechanism; degree of freedom; kinematics; singularity

(责任编辑 史小丽)