

文章编号 1004-924X(2014)12-3310-08

支链偏置的并联机构工作空间分析及尺度综合

沈林勇*, 黄晨晨, 钱晋武, 邱亚, 章亚男

(上海大学 机电工程与自动化学院 智能机械与系统实验室, 上海 200072)

摘要:以设计结构紧凑、工作空间大的力/触觉反馈器为目标,研究了 Delta 并联机构的运动学和工作空间特性。在改进 Delta 机构的基础上,引入支链机构的偏置安装角度 α ,利用矢量法求解了机构的位置逆解和正解,并通过算例验证了方程求解正、逆解的正确性;根据逆解公式推导出单开链子空间包络体边界方程,绘制分析了驱动杆与摆动杆长短不同时 3 种情况下的子空间几何形状。然后,详细讨论了 α 对整体工作空间和机构总体外围尺寸的影响,采用数值法得出了偏置安装角度 α 与工作空间最大内切球体体积的关系图、偏置角度与整体外围尺寸的关系图,并利用 matlab 绘制出整体空间截面图。最后,以上述最大内切球体为设计空间,结合雅克比矩阵条件数给出设计实例。验证结果表明,采用该方法能够满足对 Delta 机构的优化设计要求。

关键词:Delta 机器人;并联机构;运动学分析;工作空间;条件数;支链偏置

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3310

Workspace analysis and dimensional synthesis on a delta parallel mechanism with branch chain offset

SHEN Lin-yong*, HUANG Chen-chen, QIAN Jin-wu, QIU Ya, ZHANG Ya-nan

(Laboratory of Intelligent Machine and System, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: shenlycn@163.com

Abstract: To design a force/tactile feedback device with compact construct and a larger workspace, the kinematics analysis and working space algorithm were researched based on the Delta mechanism. Based on the improved Delta mechanism, a chain offset angle α was introduced. Positive and inverse kinematics were established by the vector method and their correctness were verified by taking a deduced equation as an example. According to the inverse kinematics formula, the envelope body equation of single-open-chain subspace was deduced and the geometric shape of the subspace was drawn under three situations while the length of drive rod is more than or equals to or less than that of oscillating rod. Then the influence of α on the whole workspace and mechanism size was deeply discussed. The relations between the offset angle and the volume of the maximum inscribed sphere, the offset angle and the whole mechanism size were derived using the numerical method. Moreover, the cross section view of the space was plotted by MATLAB. Finally, the maximum inscribed sphere was

收稿日期:2014-02-21;修订日期:2014-04-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975165);上海市学科带头人计划资助项目(No. 10XD1401900)

taken as the design space, and a design example was given by using the Jacobin matrix condition number. The results after verifying show that the designed mechanism meets requirements of optimized design Delta mechanisms.

Key words: delta robot; parallel mechanism; kinematics analysis; workspace; condition number; branch chain offset

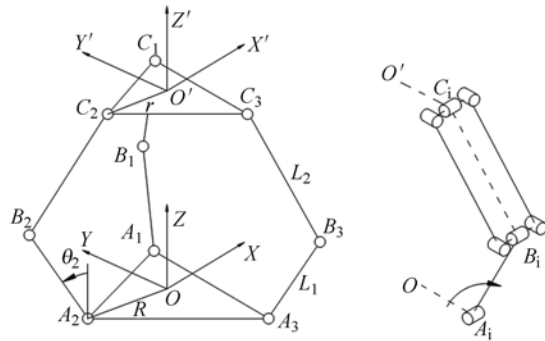
1 引言

并联机构具有刚度高、承载能力强、末端惯量小、运动精度高等优点,但受运动副约束、支链干涉等因素影响存在工作空间小等缺点。Delta 机器人最早由瑞士的 Clavel 博士在 1985 年提出并申请专利^[1-2],是研究深度和实用化程度较高的机型之一。1995 年, Tsai 提出了一种改进型 Delta 机构^[3-5],具有 3 个平动自由度,克服了空间小的缺点,适用于多种应用场合。并联机构的空间求解向来比较复杂,依赖于位置解的研究结果。王铁军等利用空间极限边界数值搜索算法讨论了并联机器人的位姿和工作空间^[6]。高秀兰等利用曲面包络理论分析并联机构的空间边界解析式^[7]。梁香宁等对 Delta 机构的运动学进行了详细的研究,分析了工作空间并进行了仿真^[8]。王霄等采用几何分析与数值迭代相结合的方法,探索了工作空间每一区域的边界,得到了机构工作空间的完整描述^[9]。本文以设计结构紧凑、工作空间大的力/触觉反馈器为目标,在改进型 Delta 机构的基础上,引入支链偏置安装角度 α ,分析该角度对空间位姿和大小的影响,最后结合雅克比矩阵条件数给出设计实例。结果表明,引入支链偏置安装角度 α 能够满足对 Delta 机构的优化设计要求。

2 运动学分析

支链偏置型 Delta 并联机器人由 3 组对称布置的相同支链连接上、下平台组成,每条支链中存在一组平行四边形,所有连接处均采用旋转副。考虑到动平台做 3 自由度平动,且任意支链中平行四边形从动杆运动相同,因此连接平行四边形短边中点,建立虚杆 BC 来代替平行四边形,图 1 所示为机构简图及单支链示意图。

固定坐标系 O-XYZ 的原点设置在固定平台



(a)机构简图 (b)单支链示意图
(a) Sketch plan of mechanism (b) Branch chain

图 1 并联机器人示意图

Fig. 1 Sketch plan of parallel robot

中心,动坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 的原点位于动平台中心,上下平台均为等边三角形,外接圆半径分别为 r, R ,其差值为 e ^[10]。驱动杆 $A_i B_i$ 长度为 L_1 ,从动杆 $B_i C_i$ 长度为 L_2 ,驱动角 θ_i 是 $A_i B_i$ 对基座的张角, ϕ_i 为 OA_i 与 x 轴的夹角, α 为驱动杆 $A_i B_i$ 与 OA_i 的夹角,当 α 等于 0 时,机构等同于标准的非偏置式 Delta 机构。固定平台铰链点分布及各角度参数如图 2 所示。

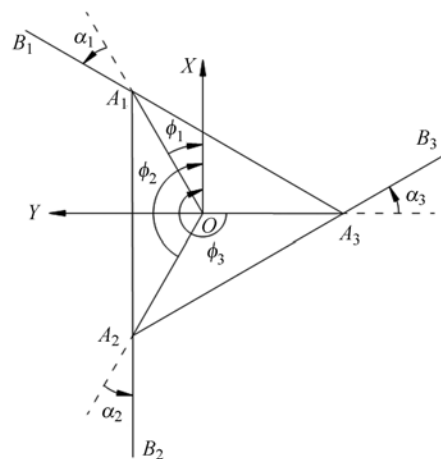


图 2 固定平台示意图

Fig. 2 Sketch plan of fixed platform

末端平台在静坐标系中的位置矢量 $\mathbf{OO}' = [x \ y \ z]^T$,根据装配关系,可得位置逆解模型:

$$\theta_i = 2\arctan(t_i) \quad i=1,2,3, \quad (1)$$

其中, t_i 通过一元二次方程 $K_i t_i^2 + U_i t_i + V_i = 0$ 求解, 式中:

$$\begin{aligned} K_i &= e^2 + L_1^2 - L_2^2 + 2zL_1 + x^2 + y^2 + z^2 - \\ &\quad 2xecos\phi_i - 2y\sin\phi_i \\ U_i &= 4L_1[\cos\alpha - x\cos(\phi_i + \alpha) - y\sin(\phi_i + \alpha)] \\ V_i &= e^2 + L_1^2 - L_2^2 - 2zL_1 + x^2 + y^2 + z^2 - \\ &\quad 2xecos\phi_i - 2y\sin\phi_i \end{aligned}$$

于是, 在已知末端位置 x, y, z 的情况下, 机构尺度参数 $L_1, L_2, R, r, \varphi_i, \alpha$ 也都为已知量时, 可以求得 θ_i 。

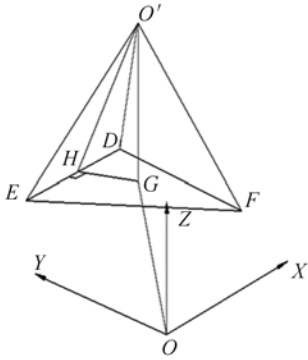


图 3 正解等效模型

Fig. 3 Equivalent model of forward kinematic

在作正解分析时, 采用空间几何和矢量代数法建立简化运动学模型^[11], 将虚杆 $B_i C_i$ 沿 $C_i O'$ 移动至动平台中心, 形成三角锥, 如图 3 所示。当驱动角度确定时, 机构位姿不变, 则三角锥 D, E, F 三点的位置可由矢量法获知, 把求解末端位置简化为已知三角锥底面三角顶点坐标求解顶点坐标的问题。可推出正解方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{OO}' &= \mathbf{OH} + \mathbf{HG} + \mathbf{G'O} = (\mathbf{OE} + \mathbf{OD})/2 + \\ &\quad \sqrt{|\mathbf{EG}|^2 + |\mathbf{EH}|^2} \cdot \frac{\mathbf{DE} \times \mathbf{EF} \times \mathbf{DE}}{|\mathbf{DE} \times \mathbf{EF} \times \mathbf{DE}|} + \\ &\quad \sqrt{|\mathbf{O'D}|^2 - |\mathbf{DG}|^2} \cdot \frac{\mathbf{EF} \times \mathbf{ED}}{|\mathbf{EF} \times \mathbf{ED}|}, \quad (2) \end{aligned}$$

根据上述推得的方程进行下列算例验证。

给定杆件参数: 固定平台半径 $R=50$ mm, 动平台半径 $r=40$ mm, 则上下平台半径差 $e=10$ mm, 驱动杆杆长 $L_1=60$ mm、摆动杆杆长 $L_2=103$ mm, 基平台半径与 x 轴夹角分别为 $\varphi_1=30^\circ$ 、 $\varphi_2=150^\circ$ 、 $\varphi_3=270^\circ$, 驱动杆安装偏置角 $\alpha=30^\circ$ 。通过 matlab 运算正反解如表 1、表 2 所示。

表 1 位置正解数值算例

Tab. 1 Numerical examples of forward kinematic solution

驱动角度/(°)			位置正解/mm		
θ_1	θ_2	θ_3	x	y	z
0	0	0	0	0	162.5
90	90	90	0	0	76.6
0	120	120	-51.7	-74.6	34.8
0	0	120	0	-97.6	60.1

表 2 位置逆解数值算例

Tab. 2 Numerical examples of reverse kinematic solution

初始位置/mm			位置逆解/(°)		
x	y	z	θ_1	θ_2	θ_3
0	0	162	$3^\circ 38'$	$3^\circ 38'$	$3^\circ 38'$
0	0	76	$90^\circ 35'$	$90^\circ 35'$	$90^\circ 35'$
-51	-74	34	$0^\circ 38'$	$121^\circ 40'$	$122^\circ 25'$
0	-97	60	$0^\circ 40'$	$0^\circ 5'$	$120^\circ 22'$

当末端点从 $(0, 0, 162)$ 移动到 $(0, 0, 162.5)$ 时, 三支链驱动角同时转过 $3^\circ 38'$; 当 3 个驱动角度相同时, 根据机构对称性, 末端点确实位于 z 轴上; 当驱动角度分别为 $0, 0$ 和 120° 时, 末端点位于 $x=0$ 的 $y-z$ 平面上。从这些特殊位置可以看出, 以上方法计算正、逆解结果正确。

3 工作空间分析

3.1 单支链子空间边界曲面

首先讨论单支链工作空间, 由支链矢量关系可知:

$$[x - L_1 \sin \theta_i \cos(\phi_i + \alpha_i) - e \cos \phi_i]^2 + [y - L_1 \sin \theta_i \sin(\phi_i + \alpha_i) - e \sin \phi_i]^2 + (z - L_1 \cos \theta_i)^2 = L_2^2, \quad (3)$$

$$\text{令 } f_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - L_2^2 = 0, \quad (4)$$

$$\text{其中: } \begin{cases} x_i = L_1 \sin \theta_i \cos(\phi_i + \alpha_i) + e \cos \phi_i \\ y_i = L_1 \sin \theta_i \sin(\phi_i + \alpha_i) + e \sin \phi_i \\ z_i = L_1 \cos \theta_i \end{cases}$$

上组公式代表以 $N_i(e \cos \phi_i, e \sin \phi_i, 0)$ 为圆心, L_1 为半径的圆弧, 记为 Σ_i , 表示的是 B_i 点的运动轨迹。 f_i 代表以 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 为中心, L_2 为半径的球面 T_i 。

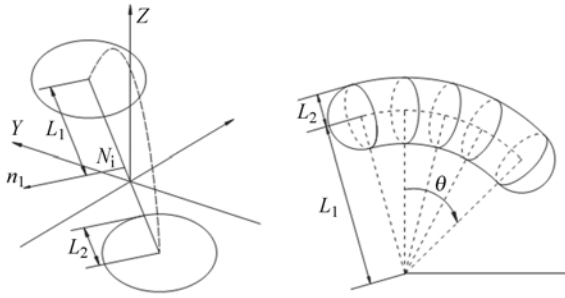
当 θ_i 变化时, 动平台中心 O' 变化范围是球面 T_i 的球心 S_i 沿圆弧 Σ_i 连续移动所形成的包络

体。该包络体外边界包络面轴线过 N_i , 轴线方向的单位向量为 n_i , 如图 4(a) 所示。

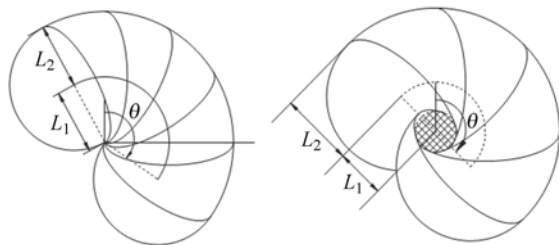
当 $L_1 > L_2$ 时, 包络面边界为一圆环面;

当 $L_1 = L_2$ 时, 包络面边界为一前后两面中心下陷类似圆盘的形状;

当 $L_1 < L_2$ 时, 包络面为中间有空洞的类似圆盘的形状, 空洞大小为半径为 $(L_2 - L_1)$ 的球体。



(a)单支链包络体中心线 (b) $L_1 > L_2$ 时单支链包络体形成图
(a)Centerline of single-open-chain's envelope body (b)Forming process of single-open-chain's envelope body while $L_1 > L_2$



(c) $L_1 = L_2$ 时单支链包络体形成图 (d) $L_1 < L_2$ 时单支链包络体形成图
(c)Forming process of single-open-chain's envelope body while $L_1 = L_2$ (d)Forming process of single-open-chain's envelope body while $L_1 < L_2$

图 4 单支链包络体中心线图和包络体形成图

Fig. 4 Centerline and forming processes of single-open-chain's envelope body

将反解公式展开:

$$(2L_1 e \cos \alpha_i - 2xL_1 \cos(\phi_i + \alpha_i) - 2yL_1 \sin(\phi_i + \alpha_i)) \sin \theta_i - 2zL_1 \cos \theta_i + x^2 + y^2 + z^2 + e^2 - 2x e \cos \phi_i - 2y e \sin \phi_i + L_1^2 - L_2^2 = 0, \quad (5)$$

令 $a \sin \theta_i + b \cos \theta_i = c$

根据三角函数关系 $\left| \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right| \leq 1$, 得到:

$$(2L_1 e \cos \alpha_i - 2xL_1 \cos(\phi_i + \alpha_i) - 2yL_1 \sin(\phi_i + \alpha_i))^2 + (-2zL_1)^2 \geq (L_2^2 - L_1^2 - x^2 - y^2 - z^2 - e^2 + 2x e \cos \phi_i + 2y e \sin \phi_i)^2. \quad (6)$$

当等号成立的时候即为单支链子空间的边界曲面方程。

3.2 偏置角度 α 对工作空间的影响

并联机构工作空间为动平台中心点可到达的工作区域, 是各支链子空间的交集去掉各支链子空间空洞的并集, 通常在外边界会形成不规则几何凸起, 故常常采用可达空间的最大内切规则几何体作为并联机构的设计空间^[7,12]。由于机构支链的对称布置, 最大内切规则几何体中心必然出现在 Z 轴正半轴某个点 $(0, 0, Z_{\text{centre}})$ 上。当 $\alpha > 90^\circ$ 时, 由于机构对称布置, 其空间大小与 $\alpha = 90^\circ$ 时一致, 因此假设 α 可以从 0° 变化到 90° , 讨论不同角度对空间的影响。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 三支链边界中心线交于 G 点, 坐标为 $G(0, 0, \sqrt{L_1^2 - e^2})$, 以 G 点为球心, L_2 为半径的球体 G 必然切于各子空间。此时, L_2 决定了空间大小, 如图 5 所示, L_1 和 e 决定了工作空间的中心位置。

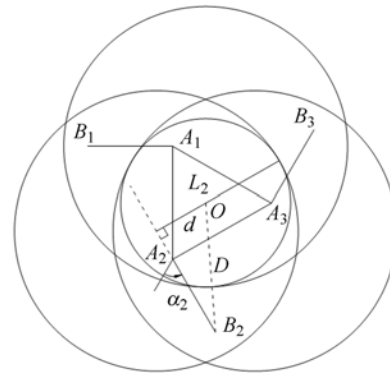


图 5 α 为某锐角时工作空间的最大截面

Fig. 5 Maximum workspace section graph under an acute angle

随着 α 由 0° 变化到 90° , 各支链中心线所在平面也相应产生偏移, 三支链不能交于一点, 在同等结构尺度下, 工作空间交集会逐渐减小, 但随着偏移角度增大, 整体机构也更加紧凑。当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 中心线所在平面与 Z 轴距离 d 为 0; 当 $\alpha = 30^\circ$ 时, 中心线所在平面离 Z 轴距离 d 为 $e/2$; 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 中心线所在平面离 Z 轴距离最远, 达到 e 。由几何关系可知, 中心线与 Z 轴的垂轴最短距离 d 为 $e \sin \alpha$, 该垂轴所在垂直于 Z 轴的平面为工作

空间的 α 最大截面,该截面与 Z 轴交于点 $(0, 0, \sqrt{L_1^2 - e^2 \cos^2 \alpha})$,则以点 $(0, 0, \sqrt{L_1^2 - e^2 \cos^2 \alpha})$ 为圆心,半径 L 等于 $(L_2 - e \sin \alpha)$ 的球体必然内切于工作空间。

同时,当 α 由 0° 变化到 90° 期间,单支链逐渐向中心收敛,整体向外扩张的尺寸变小,假设以驱动杆 $A_i B_i$ 摆动到水平位置,通过3个 B_i 点的圆为机构整体尺寸的范围,则此圆半径为 $\sqrt{R^2 + L_1^2 + 2L_1 R \cos \alpha}$, α 越大,尺寸越小。

取固定平台半径 $R=50$ mm,动平台半径 $r=40$ mm,驱动杆杆长 $L_1=60$ mm、摆动杆杆长 $L_2=103$ mm, $\varphi_1=30^\circ, \varphi_2=150^\circ, \varphi_3=270^\circ$,当 $\alpha=30^\circ$ 时,利用 matlab 绘制三支链子空间交集,如图 6 所示。带符号的 3 条包围圈分别表示 3 个支链的可达区域截面,中间的圆则表示半径 $L=(L_2 - e \sin \alpha)$ 的球体截面,可以看出:以 $(0, 0, \sqrt{L_1^2 - e^2 \cos^2 \alpha})$ 为原点, L 为半径的球体内切于机构工作空间,为最大内切球体,设计时可以该球体为设计空间。

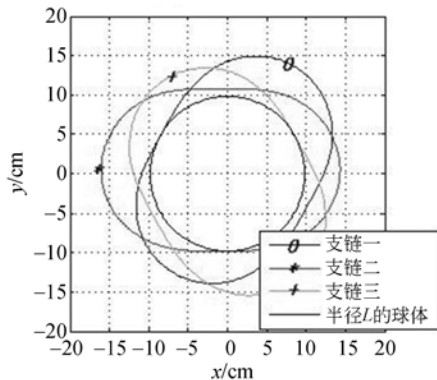


图 6 $\alpha=30^\circ$ 时三支链子空间交集
Fig. 6 Three subspace's intersection at alpha of 30°

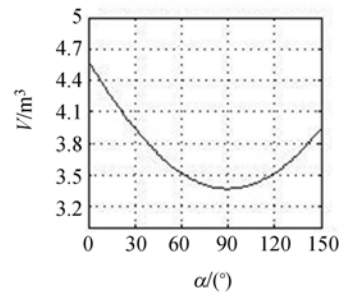
绘制内切球体体积和机构外围直径随 α 的变化规律曲线如图 7 所示。

从图 7 中可以看出:

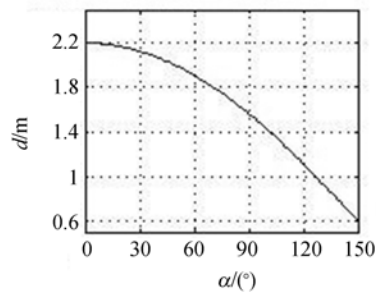
(1)随着 α 从 0° 增加到 90° ,单支链子空间可达区域逐渐偏移 Z 轴,在 90° 时偏移达到最大,子空间交集变得最小。

(2)当 $\alpha > 90^\circ$ 时,由于机构对称布置,其空间大小与 $\alpha=90^\circ$ 时一致,因此在做机构设计时可只考虑 $\alpha=0 \sim 90^\circ$ 时的情况。

(3)偏置角度 α 越大,机构越收拢,整体尺寸越小。



(a)工作空间内切球体随 α 变化规律曲线
(a)Relation between alpha and workspace sphere



(b)机构外围直径随 α 变化规律曲线
(b)Relation between alpha and mechanism outside diameter

图 7 内切球体体积和机构外围直径变化曲线

Fig. 7 Curves of changes in inscribed sphere volume and outside mechanism diameter

在选取尺度参数时,根据实际设计要求选择合适的 α 能保证得到符合设计要求的空间,同时能够紧凑机构。在设计空间明确的情况下,外围半径 $\sqrt{R^2 + L_1^2 + 2L_1 R \cos \alpha}$ 反映出半径随 α 的增大而减小,横向尺寸变小,点 $(0, 0, \sqrt{L_1^2 - e^2 \cos^2 \alpha})$ 为机构工作空间中心点,随着 α 的增大而上移,纵向尺寸变大;工作空间半径 $L=(L_2 - e \sin \alpha)$ 确定的情况下, α 越大,需要的摆动杆 L_2 也越长,间接也增大了机构尺寸。所以, α 取值需适中。

4 雅克比矩阵条件数

对于并联机器人,雅克比矩阵 J 是动平台在笛卡尔空间的运动速度与驱动关节速度之间的映射,根据 Gosselin 等提出的雅克比矩阵概念^[13],本机构雅克比矩阵可表示为:

$$J = A^{-1} B, \tag{7}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} \end{bmatrix},$$

f_i 是关于输入输出的隐函数。

雅克比矩阵条件数 k 用来衡量机器人的运动学性能,它是机构在某一位置输入输出运动传递精度的重要指标,定义为:^[14,15]

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}, \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\max} = \max(\sqrt{\lambda})$, $\sigma_{\min} = \min(\sqrt{\lambda})$, 分别为 \mathbf{J} 的最大最小奇异值, λ 为 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 的特征值。

条件数随不同机构位型而变化,为体现出机构在工作空间内的整体性能,一般选用全域条件数来表示机构在给定空间内的总体操作性能。条件数越小,操作性能越好。由于全域条件数公式过于复杂,积分过程不易实现,因此,采用离散型全域条件数 T_2 来近似计算:

$$T_2 = \frac{\sum kp}{C}, \quad (9)$$

式中: C 表示空间内离散点个数,分子表示空间内各离散点处条件数的累加。

在尺度综合中,可利用 T_2 最小作为目标来确定机构的主要参数(如 L_1 、 L_2 、 R 和 r)。实际设计中,还可通过类比法确定机构主要参数的初值,经过优化计算求得主要参数的最优值。

5 算例验证

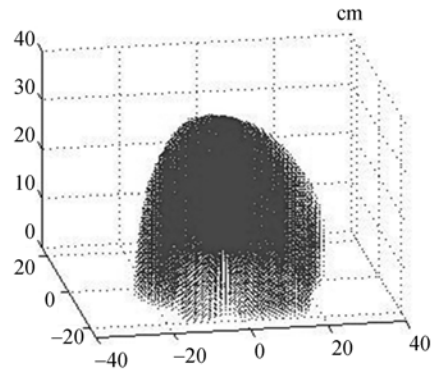
定义机构的任务空间为直径为 D ,高为 h 的圆柱体,根据现有 Delta 机械手的设计取 $\lambda_h = h/D = 0.25$,拟定设计的力反馈机构任务空间为 Φ 为 400 mm,高度为 100 mm 的圆柱体。

取 $\alpha = 30^\circ$,根据最大截面处几何关系需满足 $L_2 - e \sin \alpha > 200 \text{ mm}$,取上下平台半径差 $e = 4 \text{ cm}$,确定 L_1 、 L_2 、 r 、 R 的值使条件数达到最小,同时还要考虑到平衡机构尺寸和工作空间之间的矛盾。

条件数求解过程:以 XOY 平面为基础,将工作空间沿 z 轴分割成若干剖面,将直角坐标转换成圆柱坐标 (ρ, β, z) ,则:

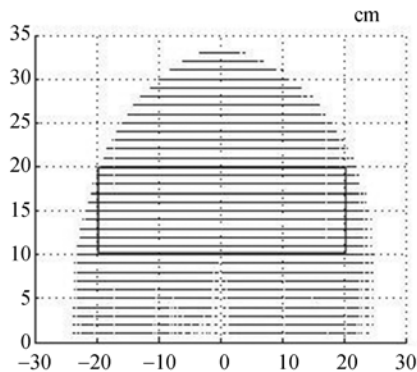
$$\begin{cases} X = \rho \cos \beta \\ Y = \rho \sin \beta \\ Z = z \end{cases}$$

通过 matlab 多层循环求条件数,搜索得到如下尺度参数: $L_1 = 12 \text{ cm}$, $L_2 = 22 \text{ cm}$, $R = 8 \text{ cm}$, $r = 4 \text{ cm}$,离散全域条件数为 6.512 5。通过单支链边界曲面方程绘制三支链空间点交集得到工作空间,如图 8 所示。



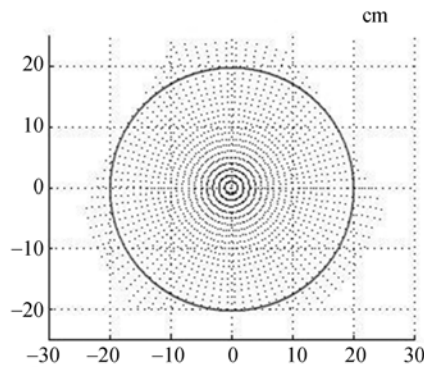
(a) 三维图

(a) Three-dimensional view



(b) 侧视图

(b) Side view



(c) 俯视图

(c) Top view

图 8 并联机构工作空间图

Fig. 8 Diagrams of working space of parallel mechanism

观察以上空间大小再通过绘制截面图可知,机构工作空间包含 Φ 为 400 mm,高度为 100 mm 的圆柱体,满足设计要求。

6 结 论

本文根据并联机构型力/触觉反馈器的设计要求,将 Delta 机构存在的工作空间小、操作性不高作为改善目标,以改进型 Delta 机器人为研究

对象,建立了引入偏置安装角度 α 的运动学模型。分析了各支链子空间的几何形状,重点讨论了偏置角度 α 对工作空间的影响,并导出设计空间大小和偏置角度的关系式,给出了工作空间截面图。采用几何矢量法和数值迭代法,求解了 Delta 并联机构的工作空间,以机构操作性能最优为辅助条件求得机构的尺度参数。最后通过实例,证明所得结果符合预定的空间设计要求,为优化结构设计奠定基础。

参考文献:

- ty for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):146-149. (in Chinese)
- [1] CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space: USA, US 4976582 [P]. 1990.
- [2] CLAVEL R. Delta, a fast robot with papallel geometry [C]. *Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robot*. 1988:91-100.
- [3] TSAI L W. Multi-degree-of-freedom mechanism for machine tools and the like: US, 5656905[P]. 1997-08-12.
- [4] TSAI L W, WALSH G C, STAMPER R E. Kinematics of a novel three DOF translational platform [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota; IEEE (Robotics & Automation Society) Staff*, 1996: 3446-3451.
- [5] TSAI L W, JOSHI S. Kinematic analysis of 3-DOF position mechanisms for use in hybrid kinematic machines [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124: 245-253.
- [6] 王铁军,刘全凯,郝长中. 六自由度并联机器人工作空间分析[J]. 沈阳工业学院学报,1999,18(3):21-25.
WANG T J, LIU Q K, HAO CH ZH. Workspace analysis for a six dofs parallel manipulator [J]. *Journal of Shenyang Institute of technology*, 1999, 18(3):21-25. (in Chinese)
- [7] 高秀兰,鲁开讲,王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学报,2008,39(5): 146-149.
GAO X L, LU K J, WANG J P. Workspace resolution and dimensional synthesis on delta parallel mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5):146-149. (in Chinese)
- [8] 梁香宁. Delta 机器人运动学建模及仿真[D]. 山西: 太原理工大学,2008,5.
LIANG X N. *Kinematic Search and Simulation of Delta Robot*[D]. Shanxi: University of Taiyuan for Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] 王霄,韩亚锋,林跃强,等. Delta 型并联运动激光切割机床的工作空间分析[J]. 农业机械学报,2007, 38(1):154-157.
WANG X, HAN Y F, LIN Y Q, et al.. Work-space analysis of a laser cutting machine tool based on delta parallel structure [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(1):154-157. (in Chinese)
- [10] 程刚,葛世荣,蒋世磊. 3-UCR 并联机构的瞬态运动学研究[J]. 光学 精密工程,2008,16(1): 108-113.
CHENG G, GE SH R, JIANG SH L. Research on transient kinematic characteristics of 3-UCR parallel robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1): 108-113.
- [11] 赵杰,朱延河,蔡鹤皋. Delta 型并联机器人运动学正解几何解法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(1):25-27.
ZHAO J, ZHU Y H, CAI H G. Geometric solution for direct kinematics of Delta parallel robot [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(1):25-27. (in Chinese)
- [12] 刘永均,张静,李柏林. 基于条件数的 3-RRS 并联机器人运动性能优化[J]. 机械设计与研究,2008, 06:32-34.
LIU Y J, ZHANG J, LI B L. Parameter optimiza-

- tion of the 3-RRS parallel robot based on the condition index[J]. *Machine Design and Research*, 2008,06:32-34.
- [13] GOSSELIN C, ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. *Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 1991, 113(3): 220-226.
- [14] 张彦斌,王慧萍,吴鑫. 完全各向同性 3 自由度平面并联机构的型综合[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 579-586.
- ZHANG Y B, WANG H P, WU X. Structure synthesis of fully-isotropic 3-DoF planar parallel manipulators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 579-586.
- [15] 石志新,罗玉峰,陈红亮,等. 机器人机构的全域性能指标研究[J]. *机器人*, 2005, 27(5): 420-422.
- SHI ZH X, LUO Y F, CHEN H L, *et al.*. On global performance indices of robotic mechanisms [J]. *Robot*, 2005, 27(5): 420-422. (in Chinese)

作者简介:

沈林勇(1962—),男,上海人,博士,副研究员,2011年于上海大学获得博士学位,主要从事医疗康复机器人技术研究,精密工程与微系统。E-mail: shenlycn@163.com



黄晨晨(1990—),女,上海人,硕士研究生,主要从事医疗康复机器人技术研究。E-mail: jasmine_cc2009@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)