

文章编号 1004-924X(2012)07-1532-10

## 六足步行机器人的并联机械腿设计

荣 誉<sup>1, 2\*</sup>, 金振林<sup>1</sup>, 曲梦可<sup>2</sup>

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北科技师范学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**将并联机构用于六足步行机器人的腿部结构,以拓展六足步行机器人的应用领域。提出了一种基于 (U+UPR)P+UPS 机构的并联机械腿,并对机械腿进行了结构参数设计。首先,对腿部机构进行了运动学分析,推导出了腿部机构的位置反解方程和速度传递方程;分析了腿部机构的工作空间并绘制了工作空间三维图,定义了工作空间性能评价指标,绘制了结构参数与工作空间性能指标的关系曲线。然后,对腿部机构进行了运动灵活性分析并绘制了雅克比矩阵条件数分布图,定义了运动灵活性评价指标,绘制了结构参数与运动灵活性指标的关系曲线。最后,基于工作空间性能指标和运动灵活性指标,采用蒙特卡罗法进行了结构参数分析,选取了一组性能较好的结构参数并考虑加工和装配工艺性,设计了一种新型 3 自由度并联机械腿的虚拟样机,为六足步行机器人的进一步研究奠定了基础。

**关键词:**并联机械腿;运动学分析;工作空间分析;性能评价指标;参数设计

**中图分类号:**TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1532

## Design of parallel mechanical leg of six-legged robot

RONG Yu<sup>1, 2\*</sup>, JIN Zhen-lin<sup>1</sup>, QU Meng-ke<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China)

\* Corresponding author, E-mail: lixiangcg@126.com

**Abstract:** A parallel mechanism was applied to the mechanical leg of a six-legged robot to expand the application areas of the six-legged robot. A new mechanical leg based on the (U+UPR)P+UPS parallel mechanism was proposed, and the structure parameters of the mechanical leg were designed. Firstly, the kinematics of leg mechanism was discussed, and the inverse position and velocity mapping equations were presented. Then, the workspace of the leg mechanism was discussed and a 3D map of the workspace was drawn. The performance evaluation index of workspace was defined and the relationship curve of the structure parameters and the evaluation index of workspace was given. Furthermore, the kinematics dexterity of the leg mechanism was analyzed, and the 3D map for condition numbers of Jacobian matrix was drawn. The performance evaluation index of kinematics dexterity was defined, and the relationship curve of the structure parameters and the index of kinematics dexterity were given. Finally, based on the indexes of workspace and kinematic dexterity, the structure parameters were analyzed by Monte Carlo method. A set of excellent structural parameters were proposed,

收稿日期:2012-03-21;修订日期:2012-05-17.

基金项目:机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目(No. MSV-2012-10);秦皇岛市科技支撑计划资助项目(No. 201101A028)

and a 3-DOF mechanical leg was designed. These results lay the theoretical foundation for the further study of six-legged robots.

**Key words:** parallel mechanical leg; kinematics analysis; workspace analysis; performance evaluation index; parameter design

## 1 引言

根据美国陆军的调查,地球上近一半的地面不能被传统的轮式或履带式车辆到达和通过<sup>[1]</sup>,随着人类生产、灾害救援、军事等方面工作的需要,人类活动的很大一部分需要在上述复杂地况下进行,例如:地面航天测控装置的运载平台<sup>[2]</sup>,地震、泥石流等灾害的救援运输平台<sup>[3]</sup>,用于军事运输、侦察等活动的机器人<sup>[4]</sup>等。对于这类作业活动,六足步行机器人有得天独厚的优势<sup>[5]</sup>。已有六足机器人的腿部主要采用串联机构或平面多连杆机构,典型的代表是美国宇航局的 ATHLETE 机器人<sup>[6]</sup>。由于串联机构的特点,这类机器人要么为实现大载重能力而导致机体和腿都十分庞大,要么为实现结构紧凑而导致机体和腿都脆弱单薄,这些大大限制了六足机器人的用途。并联机构承载能力大、运动精度高、机构构型灵活,十分适合作为六足机器人的腿部结构。在国内,崔冰艳等对并联腿部结构四足步行器做过深入的研究<sup>[7-9]</sup>,王洪波等对四足/两足可重组并联机器人做过深入的研究<sup>[10-11]</sup>。

本文提出一种用于六足机器人的新型并联机械腿,该机械腿的机构原型为(U+UPR)P+UPS机构,具有承载能力强、运动灵活、工作空间大等优点。对机械腿进行了运动学分析和工作空间分析,并定义了工作空间性能评价指标和运动灵活性评价指标,详细分析了结构参数和评价指标之间的关系。最后,结合性能评价指标,采用蒙特卡罗法选取了一组性能较好的结构参数,并设计了一种新型三自由度并联机械腿虚拟样机。

## 2 三自由度并联机械腿的构型描述

本文提出的新型三自由度并联机械腿的构型采用的是(U+UPR)P+UPS并联机构,机构简图如图1所示。(U+UPR)P+UPS机构由机

架、运动平台和连接二者的一条含有闭环(U+UPR)P支链和一条UPS支链组成。在此,U、P、S和R分别表示虎克铰、移动副、球铰和转动副。其中,(U+UPR)P支链的主干部分UP链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过移动副的末端与运动平台垂直固接;(U+UPR)P支链闭环

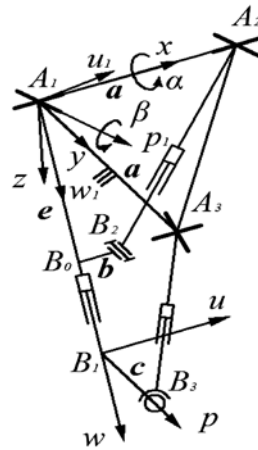


图1 并联机械腿机构简图

Fig.1 Structure of mechanical leg

部分的UPR链一端通过虎克铰与机架连接,另一端的转动副通过中间连接杆 $B_0B_2$ 垂直连接到主干部分UP链的虎克铰与移动副中间,且UPR链与主干部分UP链共面。UPS支链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过球铰与运动平台连接,且UPS支链与(U+UPR)P支链主干部分的UP链共面。在运动副布局方面,与机架连接的3个虎克铰中心呈等腰直角三角形布局,且(U+UPR)P支链主干部分UP链的虎克铰中心位于直角顶点处;(U+UPR)P支链与机架连接的2个虎克铰靠近机架的回转轴共线,UPS支链的虎克铰靠近机架的回转轴与上述回转轴平行;UPR链的转动副回转轴与(U+UPR)P支链所在平面垂直。

用螺旋理论<sup>[12]</sup>对(U+UPR)P+UPS并联机构进行自由度及约束分析,可知该机构是具有2

个转动、1 个平移自由度的三自由度机构,其约束为 2 个约束力和 1 个约束力偶。在机械腿与机器人躯干连接时,让机械腿的 UPR 链位于机器人主运动方向(正前方),UPS 支链位于次运动方向(正侧方)。根据文献[13],机械腿的前后摆动运动完全由 UPR 链实现;机械腿的左右摆动运动完全由 UPS 支链实现,从而实现了转动运动的解耦性,机械腿的任意方向摆动均可以由这 2 个解耦转动的线性组合得出。

### 3 腿部机构运动学分析

#### 3.1 坐标系建立与动平台姿态描述

在图 1 中,  $A_1$  表示 UP 链虎克铰回转中心,  $A_2$  表示 UPR 链虎克铰回转中心,  $A_3$  表示 UPS 支链虎克铰回转中心。  $B_0$  表示中间连接杆轴线与 UP 链轴线的交点,  $B_2$  表示中间连接杆轴线与 UPR 链轴线的交点,  $B_1$  表示运动平台与 UP 链轴线的交点,  $B_3$  表示运动平台与 UPS 支链连接球铰中心。设机构的主要结构参数为  $A_1 A_2 = A_1 A_3 = a$ ,  $B_0 B_2 = b$ ,  $B_1 B_3 = c$ ,  $A_1 B_0 = e$ 。

建立固定参考坐标系  $A_1 -xyz$ , 其中  $x$  轴与 UP 链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴重合;  $z$  轴与  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  所张成的平面  $A$  垂直, 方向如图 1 所示;  $y$  轴满足右手定则。建立运动坐标系  $B_1 -upw$ , 其中  $w$  轴与 UP 链轴线重合, 方向如图 1 所示;  $p$  轴沿运动平台的末端连接杆轴线  $B_1 B_3$  方向;  $u$  轴满足右手定则。为了描述支链的姿态, 在 UP 链上建立连体坐标系  $A_1 -u_1 p_1 w_1$ , 其中  $w_1$  轴与 UP 链的轴线重合并由点  $A_1$  指向点  $B_1$ ;  $p_1$  轴与 UP 链连接机架虎克铰远离机架的回转轴重合, 方向如图 1 所示;  $u_1$  轴满足右手定则。通过分析可知, 坐标系  $B_1 -upw$  与坐标系  $A_1 -u_1 p_1 w_1$  平行。

根据前面对坐标系的定义, 坐标系  $B_1 -upw$  相对于坐标系  $A_1 -xyz$  的姿态可以通过 2 次旋转实现: 首先绕  $x$  轴旋转角度  $\alpha$ , 然后绕  $p_1$  轴旋转角度  $\beta$ 。由此可以构造得到旋转矩阵表示为

$$\mathbf{R} = \text{Rot}(x, \alpha) \text{Rot}(p_1, \beta) = [\mathbf{u} \quad \mathbf{p} \quad \mathbf{w}], \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{p}$  和  $\mathbf{w}$  分别为轴  $u$ 、 $p$  和  $w$  在固定坐标系  $A_1 -xyz$  中的单位主矢量。

在选取运动平台参考点时, 由于 UP 链末端与运动平台固接在一起, 所以选取  $B_1$  为其参

考点。

#### 3.2 位置反解分析

位置反解<sup>[14]</sup>就是已知动平台参考点  $B_1$  在固定坐标系  $A_1 -xyz$  中的位置矢量  $\mathbf{l}_1 = [x \quad y \quad z]^T$ , 求解各支链的杆长  $l_i (i=1, 2, 3)$  和姿态角  $\alpha$ 、 $\beta$ 。在固定参考坐标系  $A_1 -xyz$  中, 建立位置闭环矢量约束方程

$$\mathbf{l}_1 = l_1 \mathbf{w}_1, \quad (2)$$

$$e \mathbf{w}_1 = \mathbf{a}_2 + l_2 \mathbf{w}_2 - \mathbf{b}, \quad (3)$$

$$\mathbf{l}_1 = \mathbf{a}_3 + l_3 \mathbf{w}_3 - \mathbf{c}, \quad (4)$$

式中,  $l_i$  和  $\mathbf{w}_i (i=1, 2, 3)$  分别表示支链  $i$  的杆长和单位矢量,  $\mathbf{a}_2$  表示矢量  $A_1 A_2$ ,  $\mathbf{a}_3$  表示矢量  $A_1 A_3$ ,  $\mathbf{b}$  表示矢量  $B_0 B_2$ ,  $\mathbf{c}$  表示矢量  $B_1 B_3$ 。由式(2)等号两边同时取范数, 可以求得 UP 链的杆长为

$$l_1 = \|\mathbf{l}_1\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (5)$$

由式(3)等号两边同时取范数整理, 得

$$l_2 = \|\mathbf{e} \mathbf{w}_1 + \mathbf{b} - \mathbf{a}_2\|, \quad (6)$$

由式(4)等号两边同时取范数整理, 得

$$l_3 = \|\mathbf{l}_1 + \mathbf{c} - \mathbf{a}_3\|, \quad (7)$$

另外, 由式(2)可得

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_1 = \mathbf{l}_1 / l_1 = [w_x \quad w_y \quad w_z]^T, \quad (8)$$

据此, 通过式(1)可以求出坐标系  $B_1 -upw$  相对坐标系  $A_1 -xyz$  的姿态角为

$$\alpha = \arcsin(w_x), \beta = \arctan\left[\frac{-w_y}{w_z}\right]. \quad (9)$$

将由式(9)求得的姿态角数值代入式(6)~(7)即可求出 UPR 链和 UPS 支链的杆长。

#### 3.3 速度映射分析

速度映射这里指的是动平台参考点  $B_1$  的速度与各支链轴向驱动移动副伸缩速度间的映射关系, 速度映射分析的目的在于得出速度雅克比矩阵, 从而进行运动学传递性能分析<sup>[15]</sup>。

对式(2)~(4)两边关于时间  $t$  求导数, 得

$$\mathbf{v}_1 = \dot{\mathbf{l}}_1 \mathbf{w}_1 + l_1 \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1, \quad (10)$$

$$e \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1 = \dot{\mathbf{l}}_2 \mathbf{w}_2 + l_2 \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{w}_2 - \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{b}, \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_1 = \dot{\mathbf{l}}_3 \mathbf{w}_3 + l_3 \boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{w}_3 - \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{c}, \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{v}_1$  表示点  $B_1$  线速度,  $\boldsymbol{\omega}_i$  和  $\dot{\mathbf{l}}_i$  分别表示支链  $i (i=1, 2, 3)$  整体角速度及其驱动移动副伸缩速度。

由几何关系有  $\mathbf{w}_i (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i) = 0, (i=1, 2, 3)$ 。因此, 对式(10)两边同时点乘  $\mathbf{w}_1$ , 对式(11)两边同时点乘  $\mathbf{w}_2$ , 对式(12)两边同时点乘  $\mathbf{w}_3$ , 从而

得到

$$\dot{\boldsymbol{i}}_1 = \boldsymbol{w}_1^T \boldsymbol{v}_1, \quad (13)$$

$$e(\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{w}_2)^T \boldsymbol{\omega}_1 = \dot{\boldsymbol{i}}_2 - (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{w}_2)^T \boldsymbol{\omega}_1, \quad (14)$$

$$\boldsymbol{w}_3^T \boldsymbol{v}_1 = \dot{\boldsymbol{i}}_3 - (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{w}_3)^T \boldsymbol{\omega}_1. \quad (15)$$

将式(13)~(15)写成矩阵形式可得机构关节速度与运动平台广义速度  $\boldsymbol{v} = [\boldsymbol{v}_1 \quad \boldsymbol{\omega}_1]^T$  映射关系

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{i}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{i}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{i}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_1^T & 0 \\ 0 & e(\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{w}_2)^T + (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{w}_2)^T \\ \boldsymbol{w}_3^T & (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{w}_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_1 \\ \boldsymbol{\omega}_1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

或简记为:

$$\dot{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J}[\boldsymbol{v}_1 \quad \boldsymbol{\omega}_1]^T, \quad (17)$$

式中:  $\dot{\boldsymbol{i}} = [\dot{\boldsymbol{i}}_1 \quad \dot{\boldsymbol{i}}_2 \quad \dot{\boldsymbol{i}}_3]^T$  为关节速度,  $\boldsymbol{J}$  为速度雅克比矩阵  $\boldsymbol{J} \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ 。

为分析线速度映射,需要构造  $\boldsymbol{\omega}_1$  与  $\boldsymbol{v}_1$  的映射关系,对式(10)两边同时叉乘  $\boldsymbol{w}_1$ ,通过三重向量积公式,有:

$$\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{v}_1 = l_1[\boldsymbol{\omega}_1 - (\boldsymbol{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1) \boldsymbol{w}_1], \quad (18)$$

因为 UP 支链绕自身轴线的旋转运动受到约束,故上式中有  $\boldsymbol{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1 = 0$ ,于是有:

$$\boldsymbol{\omega}_1 = (\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{v}_1) / l_1, \quad (19)$$

将式(19)带入式(14)、(15),有:

$$\frac{e}{l_1} (\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{w}_2)^T (\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{v}_1) = \dot{\boldsymbol{i}}_2 - \frac{1}{l_1} (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{w}_2)^T (\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{v}_1), \quad (20)$$

$$\boldsymbol{w}_3^T \boldsymbol{v}_1 = \dot{\boldsymbol{i}}_3 - \frac{1}{l_1} (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{w}_3)^T (\boldsymbol{w}_1 \times \boldsymbol{v}_1). \quad (21)$$

根据几何关系,有  $\boldsymbol{b}^T \boldsymbol{w}_1 = 0$ ,  $\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{w}_1 = 0$ ,则式(20)、(21)变为:

$$\dot{\boldsymbol{i}}_2 = -\frac{1}{l_1} \boldsymbol{w}_2^T \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{v}_1, \quad (22)$$

$$\dot{\boldsymbol{i}}_3 = \boldsymbol{w}_3^T \boldsymbol{v}_1 - \frac{1}{l_1} \boldsymbol{w}_3^T \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{c}^T \boldsymbol{v}_1. \quad (23)$$

将式(13)、(22)、(23)写成矩阵形式,可得关节速度与运动平台参考点线速度  $\boldsymbol{v}_1$  映射关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{i}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{i}}_2 \\ \dot{\boldsymbol{i}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_1^T \\ -\frac{1}{l_1} \boldsymbol{w}_2^T \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{b}^T \\ \boldsymbol{w}_3^T - \frac{1}{l_1} \boldsymbol{w}_3^T \boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{c}^T \end{bmatrix} \boldsymbol{v}_1, \quad (24)$$

或简记为:

$$\dot{\boldsymbol{i}} = \boldsymbol{J}_v \boldsymbol{v}_1, \quad (25)$$

式中:  $\dot{\boldsymbol{i}} = [\dot{\boldsymbol{i}}_1 \quad \dot{\boldsymbol{i}}_2 \quad \dot{\boldsymbol{i}}_3]^T$  为关节速度矢量,  $\boldsymbol{J}_v$  为线速度雅克比矩阵,  $\boldsymbol{J}_v \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 。

## 4 腿部机构工作空间分析

分析结构参数和工作空间之间的关系可以为机械腿的结构设计提供依据。(U+UPR)P+UPS机构的可达工作空间为在不破坏结构约束的条件下,动平台参考点  $B_1$  所能达到的空间点位集合<sup>[16]</sup>,记作  $S$ 。这里,定义动平台平行于机架平面  $A$  且两平台距离处于其变化范围中间值  $h$  时的位姿,为初始位姿。

### 4.1 结构约束及工作空间形状分析

通过分析式(5)~(9)可知,腿部机构的工作空间大小和形状主要由各支链杆长的变化范围、支链的干涉情况、运动副的转角限制共同确定。因此,求解工作空间之前,首先对限制条件进行定义:

各杆杆长的变化范围为

$$l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}, i=1,2,3, \quad (26)$$

式中:  $l_{\min}$  为支链最小杆长,  $l_{\max}$  支链最大杆长。

设球铰初始转角为  $0^\circ$ ,则其转动条件为

$$0 \leq \eta_b \leq \eta_b \max, \quad (27)$$

式中:  $\eta_b = \arccos(\boldsymbol{q}_3 \boldsymbol{l}_3)$ ,  $\boldsymbol{q}_3$  为球铰链座与动平台平面固联的单位法向量,  $\boldsymbol{l}_3$  为 UPS 支链向量。

虎克铰绕其回转轴线转角  $\alpha_i, \beta_i$  的转动条件为

$$\alpha_i \leq \alpha_{\max}, \beta_i \leq \beta_{\max}, \quad (28)$$

式中:  $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$  为虎克铰转角最大值。

为了绘制工作空间形状,首先根据机械腿的基本结构给定一组初步结构参数:  $a=200$  mm,  $b=80$  mm,  $c=50$  mm,  $l_1 \in (500, 900)$  mm,  $l_2 \in (350, 650)$  mm,  $l_3 \in (500, 900)$  mm,  $e=450$  mm,  $h=700$  mm,  $\eta_{b\max}=35^\circ$ ,  $\alpha_{\max}=\beta_{\max}=60^\circ$ 。基于这组参数,综合式(2)~(7)和式(26)~(28),在满足机构的几何约束关系的条件下,绘制了腿部机构的位置工作空间三维实体图,如图2所示。

### 4.2 结构参数对工作空间的影响

机械腿的工作空间越大分布越均匀,就意味着机器人整体的步幅和运动灵活性越大。在机器人行走时,最重要的技术指标是单步的跨度  $L$ (即步幅)和机械腿向正前方迈步达到最大摆角时能跨越的最大高度  $Z$ ,其中  $L$  表征了机器人的跨越沟壑能力,  $Z$  表征了机器人的跨越障碍能力。因此,定义机械腿末端参考点所能达到的极限步幅

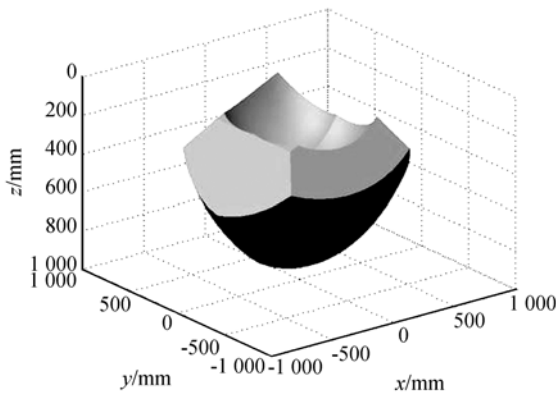


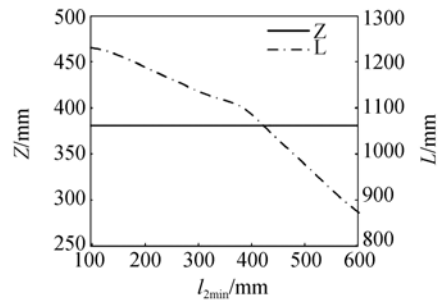
图 2 腿部机构工作空间三维图

Fig. 2 Three dimensional workspace map of mechanical leg

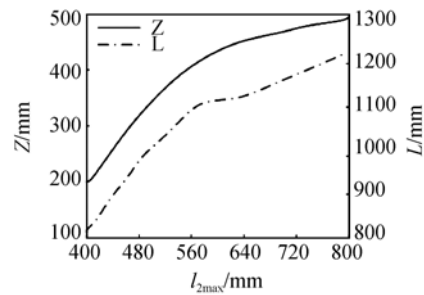
L 和极限前摆高度 Z 作为工作空间的评价指标。这两项指标可以看成结构参数的函数

$$S_{L,H} = f(a, b, c, e, \eta_{\beta_{\max}}, \alpha_{\max}, \beta_{\max}, l_{i_{\max}}, l_{i_{\max}}). \quad (29)$$

因为腿部机构是转动解耦机构,所以对 L、Z 影响较大的参数主要是影响机构前后摆动的参数 a、b、 $l_{2\min}$ 、 $l_{2\max}$ ,其余为次要参数。采用单变量分析法进行分析,绘制了结构参数 a、b、 $l_{2\min}$ 、 $l_{2\max}$  与 L、Z 的关系曲线,如图 3 所示。



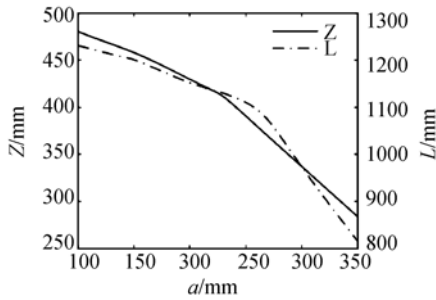
(c)  $l_{2\min}$  与 L、Z 关系  
(c)  $l_{2\min}$  and L, Z



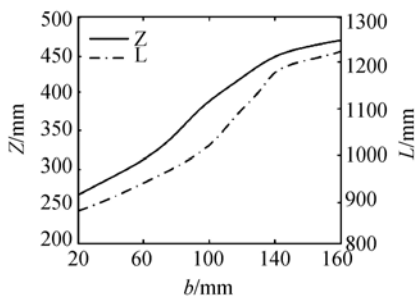
(d)  $l_{2\max}$  与 L、Z 关系  
(d)  $l_{2\max}$  and L, Z

图 3 结构参数与 L、Z 的关系

Fig. 3 Relationship between structure parameters and L, Z



(a) a 与 L、Z 关系  
(a) a and L, Z



(b) b 与 L、Z 关系  
(b) b and L, Z

由图 3 可以看出, L、Z 值随 a 值增大而减小,且变化越来越快; L、Z 值随 b 值增大而增大,且增大到一定数值后,受其它约束影响变化趋缓; L 值随  $l_{2\min}$  值增大而减小,  $l_{2\min}$  值变化对 Z 值没有影响; L、Z 值随  $l_{2\max}$  值增大而增大。

### 5 腿部机构运动灵活性分析

虽然六足机器人主运动方向为正前方,但由于存在躲避障碍、轨迹规划、调整重心等因素,机器人实际行走过程是不断进行动态方向调整的,属于动态平衡过程。因此,机器人需要朝各个方向都能灵活运动,这就要求机械腿能够朝各个方向实现灵活调姿,分析结构参数和运动灵活性之间的关系可以为机械腿的结构设计提供依据。

#### 5.1 运动灵活性评价指标

在进行运动学性能分析时,一般采用速度雅克比矩阵条件数 k 为运动灵活性评价指标<sup>[17]</sup>

$$k = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}, \quad (30)$$

式中,  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  为雅克比矩阵的最大、最小奇异值。采用前面给定的初步结构参数,用网格划分法对工作空间进行网格划分,然后编程计算条件数  $k$  在工作空间内的分布情况,如图 4 所示。

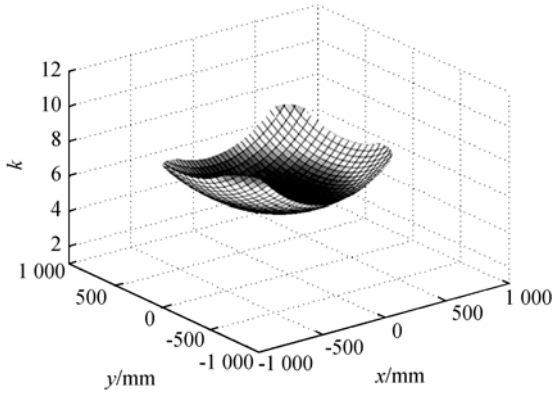


图 4 雅克比矩阵条件数  $k$  分布图

Fig. 4 Three dimensional map of condition number of Jacobian matrix

由图 4 可以看出,雅克比矩阵与机构所处的瞬时位形有关,导致雅克比矩阵的条件数会随着机构位形的变化而变化,成为局部评价指标。为了更全面彻底地分析结构参数与运动灵活性的关系,将条件数  $k$  在工作空间  $S$  内的全域均值作为腿部机构灵活性的一个评价指标<sup>[17]</sup>:

$$\bar{k} = \frac{\int_S k dS}{S}, \quad (31)$$

式中: $S$  为工作空间,  $k$  为雅克比矩阵条件数。

显然,  $\bar{k}$  表征的是均值情况,不能充分反映  $k$  在工作空间中的具体变化规律,将  $k$  在工作空间中的标准差作为腿部机构灵活性的另一个评价指标<sup>[18]</sup>:

$$\tilde{k} = \frac{\sqrt{\int_S (k - \bar{k})^2 dS}}{S}, \quad (32)$$

式中: $S$  为工作空间,  $k$  为雅克比矩阵条件数。

实际计算时,通过调用 Matlab 软件中的函数计算图 4 中各个节点的  $\bar{k}$  和  $\tilde{k}$  的值。显然,  $\bar{k}$  值越小,机械腿的全域灵活性越好;  $\tilde{k}$  值越小,机械腿的灵活性在工作空间内的一致效果越好。

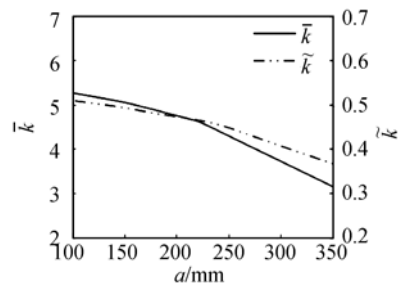
### 5.2 结构参数对运动灵活性的影响

在定义了运动灵活性评价指标之后,可以通过分析结构参数与评价指标之间的关系,为机械

腿的设计提供依据。根据雅克比矩阵表达式可知,运动灵活性评价指标可以看成结构参数的函数:

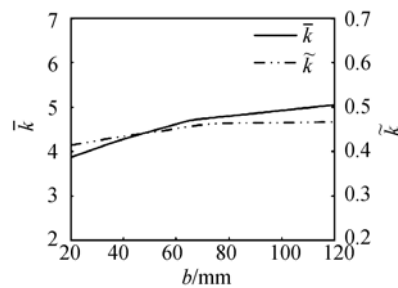
$$K_{\bar{k}, \tilde{k}} = g(a, b, c, e, \eta_{\beta_{\max}}, \alpha_{\max}, \beta_{\max}, l_{\min}, l_{\max}). \quad (33)$$

这里选择关键参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和 UPR 链的杆长伸缩量  $\Delta l_2$  进行分析。把运动灵活性指标  $\bar{k}$  和  $\tilde{k}$  作为目标函数对机构进行评价,采用单变量分析法进行分析,分别绘制了结构参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\Delta l_2$  与  $\bar{k}$ 、 $\tilde{k}$  关系的采样拟合曲线,如图 5 所示。



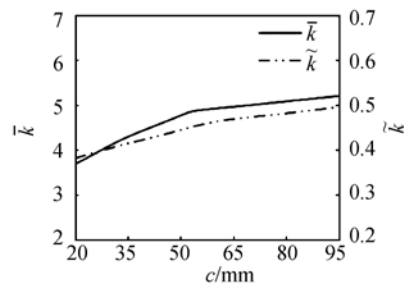
(a)  $a$  与  $\bar{k}$ 、 $\tilde{k}$  关系

(a)  $a$  and  $\bar{k}$ ,  $\tilde{k}$



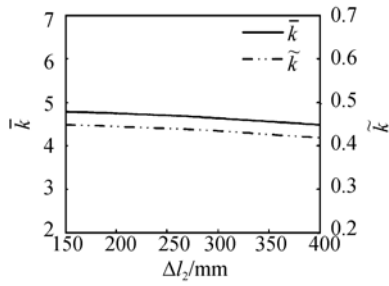
(b)  $b$  与  $\bar{k}$ 、 $\tilde{k}$  关系

(b)  $b$  and  $\bar{k}$ ,  $\tilde{k}$



(c)  $c$  与  $\bar{k}$ 、 $\tilde{k}$  关系

(c)  $c$  and  $\bar{k}$ ,  $\tilde{k}$



(d)  $\Delta l_2$  与  $\bar{k}, \tilde{k}$  关系

(d)  $\Delta l_2$  and  $\bar{k}, \tilde{k}$

图 5 结构参数与  $\bar{k}, \tilde{k}$  的关系图

Fig. 5 Relationship between structure parameters and

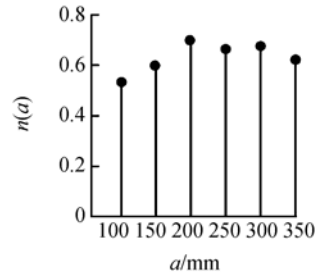
$\bar{k}, \tilde{k}$

由图 5 可以看出,  $\bar{k}, \tilde{k}$  值随  $a$  值增大而减小, 且变化越来越快;  $\bar{k}, \tilde{k}$  值随  $b, c$  值增大而增大, 但整体变化幅度不大, 且增大到一定数值后, 受其它约束影响变化趋缓;  $\bar{k}, \tilde{k}$  值随  $\Delta l_2$  值增大而缓慢减小, 且变化幅度十分小。

## 6 虚拟样机设计及仿真

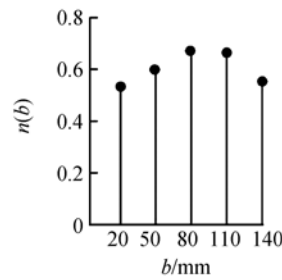
### 6.1 参数确定与虚拟样机设计

腿部机构的结构参数主要包括:  $a, b, c, e, l_{\max}$  和  $l_{\min}$ 。设计依据主要包括: 工作空间性能评价指标  $L$  和  $H$ 、运动灵活性评价指标  $\bar{k}$  和  $\tilde{k}$ 。本文采用基于性能指标  $L, Z$  和  $\bar{k}, \tilde{k}$  的蒙特卡罗法进行结构参数选取。首先, 根据前面的分析结果, 把全部结构参数分成 2 类: 主要参数 ( $a, b, l_{2\min}, l_{2\max}$ )、次要参数 ( $c, e, l_{1\min}, l_{3\min}, l_{3\max}$ )。其中, 优先对主要参数进行确定, 然后, 基于选好的主要参数值来确定次要参数。根据前面的结构参数与性能指标关系分析, 规定主要参数取值范围为:  $a \in (100, 350) \text{ mm}$ 、 $b \in (20, 150) \text{ mm}$ 、 $l_{2\min} \in (100, 400) \text{ mm}$ 、 $l_{2\max} \in (450, 800) \text{ mm}$ 。考虑工程实际, 以各项性能指标的中间值构建结构参数概率模型为:  $Z=350 \text{ mm}$ 、 $L=1\ 000 \text{ mm}$ 、 $\bar{k}=4.3$ 、 $\tilde{k}=4.7$ , 当  $Z \geq 350 \text{ mm}$ 、 $L \geq 1\ 000 \text{ mm}$ 、 $\bar{k} \leq 4.3$ 、 $\tilde{k} = 4.7$  时, 各项性能指标均较好。在各主要参数取值范围内进行抽样, 在满足腿部机构参数选型的概率模型前提下, 统计各参数抽样值的分布规律, 绘制出概率离散柱状图, 如图 6 所示。



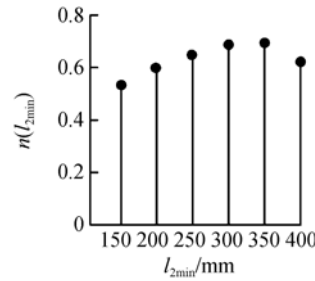
(a)  $a$  概率图

(a)  $a$  distribution



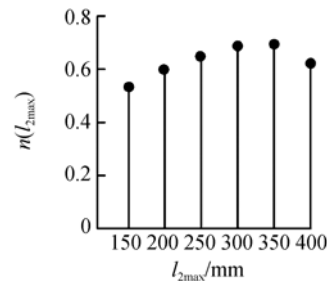
(b)  $b$  概率图

(b)  $b$  distribution



(c)  $l_{2\min}$  概率图

(c)  $l_{2\min}$  distribution



(d)  $l_{2\max}$  概率图

(d)  $l_{2\max}$  distribution

图 6 结构参数概率离散柱状图

Fig. 6 Probability distribution of structure parameters

通过分析图 6,结合机械腿机械加工工艺因素,确定腿部机构主要参数为: $a=200\text{ mm}$ 、 $b=70\text{ mm}$ 、 $l_{2\min}=330\text{ mm}$ 、 $l_{2\max}=600\text{ mm}$ 。基于以上主要参数,确定腿部机构次要参数为: $c=50\text{ mm}$ 、 $e=450\text{ mm}$ 、 $l_{1\min}=l_{3\min}=530\text{ mm}$ 、 $l_{1\max}=l_{3\max}=900\text{ mm}$ 。结合选取的结构参数,在综合考虑机器人整体要求的前提下,设计出并联机械腿虚拟样机和六足步行机器人整体结构,如图 7、8 所示。主要技术参数如表 1 所示。

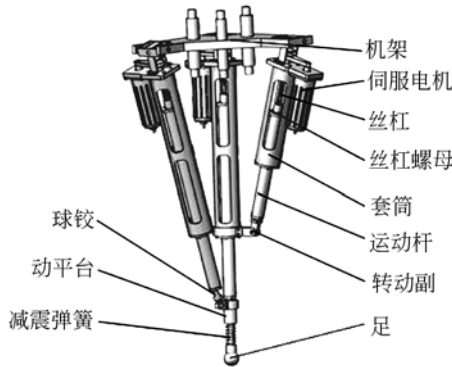


图 7 并联机械腿结构图  
Fig. 7 Structure of mechanical leg

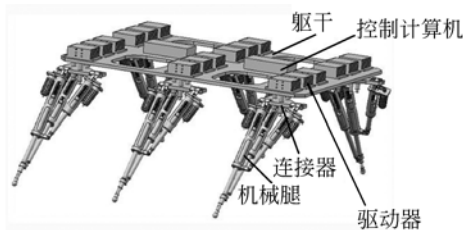


图 8 六足步行机器人整体结构图  
Fig. 8 Structure of six-legged robot

表 1 并联机械腿技术参数

Tab. 1 Structure parameters of mechanical leg (mm)

名称	尺寸/型号
固定平台结构参数 $a$	200
中间连接杆参数 $b$	70
运动平台结构参数 $c$	50
(U+UPR)P 支链参数 $e$	450
1、3 链套筒长×直径×壁厚	500×65×5
1、3 链从动杆长×直径×壁厚	500×30×3
2 链套筒长×直径×壁厚	310×65×5
2 链从动杆长×直径×壁厚	310×30×3

## 6.2 虚拟样机仿真分析

为了验证理论分析的可靠性,基于前面设计的虚拟样机,采用工程分析软件对六足机器人进行了仿真分析,如图 9 所示。基于三角步态,得出了运动过程中各驱动移动副的速度曲线,如图 10 所示。

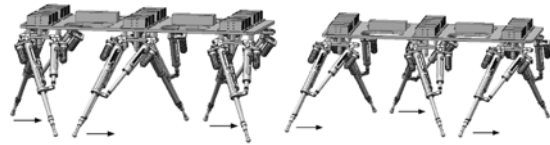


图 9 三角步态运动仿真图  
Fig. 9 Simulation of double-triangle gait

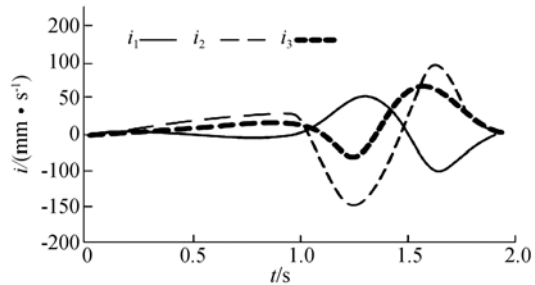


图 10 驱动移动副线速度曲线  
Fig. 10 Velocity curve of drive prismatic joint

通过分析图 10 可知,整个运动过程各驱动输入移动副的线速度均在合理范围之内,且速度变化较为平缓,说明腿部机构运动学性能较好。

## 7 结 论

提出了一种新型三自由度并联机械腿,通过对腿部机构进行运动学分析,得到了其位置反解方程和速度传递方程,绘制了其工作空间三维图。把机械腿的步幅和步高定义为工作空间性能评价指标,通过分析结构参数与工作空间性能指标关系曲线,揭示了结构参数对工作空间的影响规律。

通过对腿部机构进行运动灵活性分析,绘制了雅克比矩阵条件数在工作空间内的分布图,把雅克比条件数在工作空间内的全域均值和标准差定义为运动灵活性评价指标,通过分析结构参数与运动灵活性指标关系曲线,揭示了结构参数对运动灵活性的影响规律。

应用基于工作空间性能指标和运动灵活性指标的蒙特卡罗法进行了结构参数分析,选取了一

组性能较好的结构参数,同时考虑其加工与装配工艺性,设计了一种新型三自由度并联机械腿。这种机械腿承载能力强、工作空间大、运动灵活,十分适合作为六足步行机器人的腿部机构。

#### 参考文献:

- [1] WALDRON K J. Configuration design of the ASV. int [J]. *J. of Robotics Research*, 1984, 3(2): 37-48.
- [2] 高云国,张倩,史亚莉. 无导轨高精度位移平台的结构设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2200-2205.  
GAO Y G, ZHANG Q, SHI Y L. Structure design of precise displacement platform without guiding apparatus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2200-2205. (in Chinese)
- [3] 刘金国,王越超,李斌,等. 灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 1-12.  
LIU J G, WANG Y CH, LI B, et al.. Current research, key performances and future development of search and rescue robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(12): 1-12. (in Chinese)
- [4] 黄远灿. 国内外军用机器人产业发展现状[J]. *机器人技术与应用*, 2009(2): 25-31.  
LIU J G. Domestic and foreign military robotics industry development status [J]. *Robot Technique and Application*, 2009(2): 25-31. (in Chinese)
- [5] ELENA G, MARIA A J. The evolution of robotics research [J]. *Robotics And Automation*, 2007, 3(10): 90-102.
- [6] COLLINS C. Stiffness modeling and force distribution for the all-terrain hex-limbed extra-terrestrial explorer (ATHLETE) [C]. *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, September, 2007*: 1-9.
- [7] 崔冰艳,金振林. 基于正交机构的机器人肩关节静力学分析与结构参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 77-82.  
CUI B Y, JIN ZH L. Statics analysis and structure parameter design of robot shoulder joint based on orthogonal mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 77-82. (in Chinese)
- [8] 王炳一. 一种新型四足仿生机器人性能分析与仿真[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011: 55-70.  
WANG B Y. *Simulation and Performance Analysis on New Type of Bionic Quadruped Robot* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 55-70. (in Chinese)
- [9] 倪森. 基于 2-UPS&UP 并联结构腿的四足步行器设计[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011: 35-70.  
NI S. *The Design of Quadruped Robot Based on 2-UPS&UP Parallel Mechanism Leg* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 35-70. (in Chinese)
- [10] 王洪波,齐政彦,胡正伟,等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(8): 24-30.  
WANG H B, QI Z X, HU Z W, et al.. Application of parallel leg mechanisms in quadruped/biped Reconfigurable walking robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 24-30. (in Chinese)
- [11] 王洪波,徐桂玲,张典范,等. 助老助残四足/两足可重组并联腿步行机器人运动学建模与仿真[J]. *燕山大学学报*, 2010, 34(6): 508-515.  
WANG H B, XU G L, ZHANG D F, et al.. Kinematics modeling and simulation of quadruped/biped walking robot with parallel leg mechanism for the elderly and the disabled [J]. *Journal of Yanshan University*, 2010, 34(6): 508-515. (in Chinese)
- [12] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 277-283.  
HUANG Z, ZHAO Y S, ZHAO T S. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 277-283. (in Chinese)
- [13] 曾达幸,黄真. 基于螺旋理论的转动解耦并联机构型综合[J]. *中国科学(E辑)*, 2011, 41(5): 585-591.  
ZENG D X, HUANG ZH. Type synthesis of the rotationaldecoupledparallel mechanism based on screwtheory [J]. *Sci China Tech Sci*, 2011, 41

- (5): 585-591.
- [14] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 1996: 32-55  
XIONG Y L. *The Basis of Robotics* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1996: 32-55 (in Chinese)
- [15] JOHN J C. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* [M]. USA: Wesley Publishing Company, 1989: 117-119.
- [16] 于靖军, 刘辛军, 丁希伦, 等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2008: 11-12.  
YU J J, LIU X J, DING X L *et al.* *Mathematical foundations of robot mechanism* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008: 11-12. (in Chinese)
- [17] GOSSELIN C, ANGELES J. Global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators [J]. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 1991, 113(3):220-226.
- [18] HUANG T, GOSSELIN C M, WHITEHOUSE D J, *et al.*. Analytic approach for optimal design of a type of spherical parallel manipulators using dexterous performance indices [J]. *IMechE Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*, 2003, 217(2):203-207.

## 作者简介:



荣誉(1981—),男,吉林通化人,博士研究生,讲师,2007年于燕山大学获得硕士学位,主要从事并联机器人理论与应用方面的研究。E-mail: lixiangcg@126.com



曲梦可(1981—),女,黑龙江齐齐哈尔人,讲师,2007年于燕山大学获得硕士学位,主要从事机器人控制理论方面的研究。E-mail: qumengkerongyu@163.com

## 导师简介:



金振林(1962—),男,辽宁抚顺人,博士,教授,博士生导师,2001年于燕山大学获得博士学位,主要从事并联机器人理论与应用方面的研究。E-mail: zljn@ysu.edu.cn