

文章编号 1004-924X(2017)07-1832-11

六足机器人整机运动学分析及构型选择

张金柱¹, 金振林^{1,2*}, 张哲¹

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要:六足机器人整机构型设计和整机运动学模型是机器人样机研制和行为控制的基础。利用 GF 集理论阐明了六足机器人整机构型设计的实质即为解决机械腿在机身平台上的布局问题,并基于仿生学原理给出了 5 种整机构型。介绍了一种三自由度并联驱动腿部机构,并利用闭环矢量链及求导的方法建立了基于该腿部机构的六足机器人整机运动学模型。本文给出了六足机器人整机运动学理论及仿真算例,推导出了速度、加速度的理论值及仿真值的拟合图。拟合结果表明:角速度、角加速度的理论值与仿真值的最大误差量级分别为 $10^{-2} (^{\circ})/s$ 和 $10^{-3} (^{\circ})/s^2$,验证了理论模型的正确性。基于该理论模型,绘制了不同构型下该并联驱动腿的六足机器人的工作空间分布图,选择了工作空间较大的两种整机构型,并对这两种构型下的六足机器人的运动学性能进行对比分析,选择了一种能够更好地发挥该腿部机构综合运动能力的整机构型。本文的研究为该六足机器人的后续研究奠定了理论基础。所使用的整机运动学建模方法对其他六足机器人也实用。

关键词:六足机器人;整机构型;运动学模型;运动学性能

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1832

Kinematics analysis and configuration selection of whole machine of hexapod robot

ZHANG Jin-zhu¹, JIN Zhen-lin^{1,2}, ZHANG Zhe¹

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

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

* Corresponding author, E-mail: zljin@ysu.edu.cn

Abstract: The whole machine configuration design and kinematics model of hexapod robot are foundation of robot prototype development and behavior control. GF set theory is adopted to illustrate that essence of whole machine configuration design of hexapod robot is to solve layout problem of mechanical legs on body platform, and five types of whole machine configurations are given based on bionics principle. A kind of parallel-driven leg mechanism with three degree of freedom is introduced, and kinematics model of whole machine of hexapod robot based on this leg mechanism is established with method of close-loop vector chain and derivation. Kinematics theory and simulation example of whole machine of hexapod robot are respectively given, and fitting pictures of theory values and simulation values for speed and accelerated speed are derived. Fitting results indicate that maximum

收稿日期:2016-12-28;修订日期:2017-04-04.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(No. 2013CB035501);机械系统与振动国家重点实验室课题资助项目(No. MSV201506);河北省高等学校科学技术研究项目(No. QN2015185);河北省研究生创新资助项目(No. 2016SJS011)

error orders of theory angular speed and angular accelerated speed with those of simulated are respectively 10^{-2} ($^{\circ}$)/s and 10^{-3} ($^{\circ}$)/s², which verifies correctness of theoretical model. Work space distribution maps of hexapod robot based on this parallel-driven leg under different configurations are drawn, and two types of whole machine configurations having large work space are selected. Kinematics performance of hexapod robot under these two configurations is compared, and a whole machine configuration to better exert comprehensive athletic ability of this leg mechanism is selected. This research can lay theoretical basis for the following research of this hexapod robot. Kinematical modeling method of whole machine used is also practical for other hexapod robots.

Key words: Hexapod robot; whole machine configuration; kinematics model; kinematics performance

1 引言

多足机器人具有灵活性好,对环境的适应能力强等特性,从20世纪60年代开始,就成为了国际学者们争相研究的重要课题^[1-2]。六足机器人作为多足机器人的一种,有其独有的特性,其即比二足、四足稳定,又比八足控制简单,尤为受到广大学者的青睐。六足机器人的整机构型设计是机器人设计的关键环节,对整机的性能至关重要,但目前相关总结及研究较少。就目前已经问世的诸多六足机器人而言,整机构型类型主要可分为如下3种:(1)平面对称布局形式,如美国 irobot 公司研制的 Genghis^[3]、新西兰坎特伯雷大学研制的 Hamlet^[4]、德国慕尼黑科技大学研制的机器人 TUM^[5]及中国浙江大学^[6]、北京理工大学^[7]、哈尔滨工业大学^[8]、燕山大学^[9,10]等研制的六足机器人等;(2)椭圆面对称布局形式,如西班牙工业自动化研究所(CSIC)研制的 SIL-06^[11]、波兹南工业大学研制的 Messor^[12]、德国宇航中心(DLR)研制的 DLR-Crawler^[13]等;(3)轴对称布局形式,如日本大阪大学研制的 Asterisk^[14]、美国加州理工大学及斯坦福大学共同研制的 ATHELET^[15]、中国上海交通大学研制的六爪“章鱼机器人”^[16]及中国北京航空航天大学研制的 Noros 系列机器人^[17]等。为了进一步增加整机构型多样性,本文基于仿生学和 G_F 集理论对整机构型做了较为系统的分析与总结。

整机运动学分析是六足机器人结构设计与控制的理论基础。目前关于六足机器人整机运动学的建模方法主要为机器人特定运动状态下的机构等效法,例如,张赫^[18]利用机构等效的方法,将以三角步态运动时的机器人 HITCR 等效为 3-RRRS 并联机构,然后采用坐标变换求解其整机运动学模型;荣誉^[19]利用同样的方法,将所

研究的基于(U+UPS)P+UPS腿机构的六足机器人等效为3-UPS并联机构,并求解其整机运动学模型;潘阳^[20]利用螺旋理论对站立状态的六足章鱼机器人进行了速度分析,并得出了该机器人站立状态下的全身雅可比矩阵。然而具有普遍意义的整机运动学建模方法鲜有报道。本文采用闭环矢量链及求导方法,构建了六足机器人整机运动学模型,该模型对于一般运动状态的六足机器人都适用。此外,在整机构型和整机运动学研究的基础上,对基于所提出的并联驱动腿的多种构型下的六足机器人工作空间,速度传递性能做了对比分析,以期获得运动性能较好的整机布局形式。

2 基于仿生学的整机构型分析

自然界是人类智慧源源不断的知识宝库,在六足步行机器人设计与开发过程中,科学家们的很多创作灵感来源于六足动物。据生物学家估计地球上六足动物(昆虫)的种类大约为200万~1000万种。它们经过千百万年的进化^[21],已经形成一部部性能优良的“自然机械”。从生理机能方面剖析,六足动物(昆虫)主要包括体躯和肢体。体躯主要包括头、胸和腹三部分,其中头部是感觉和取食的中心;胸部是昆虫的运动中心,六条腿均对称连接于胸部的两侧;腹是昆虫消化食物和繁衍后代的中心,肢体是昆虫主要的行走与跳跃器官^[22]。结合上边的生理学剖析结果,对六足动物进行机构学抽象,可将六足动物看作是由胸和肢体组成的并联机构,其中胸是运动和承载的执行构件,其相当于并联机构的动平台;肢体是驱动和支撑构件,其相当于并联机构的支链。

六足动物(昆虫)的体躯能在空间内灵活运动,其自由度数是6,用 G_F 集理论可表示如下:

$$G_F^1(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma),$$

式中, $T_k (k=a, b, c)$ 和 $R_j (j=\alpha, \beta, \gamma)$ 分别表示机器人机身的移动特征和转动特征。

因此, 基于仿生思路, 六足机器人的机身也应具有相同的自由度特征。不论处于站立还是行走状态, 六足步行机器人均可以等效为一个 $n (n=3 \sim 6)$ 支链六自由度并联机构。设六足机器人第 $i (i=1 \sim 6)$ 条腿的自由度特征为 G_{Fi} , 则机身的自由度特征可表示为:

$$\bigcap_{i=1}^n G_{Fi} = G_F^1(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma).$$

由 G_F 集求交运算性质^[23]可以推出六足机器人六条腿的自由度特征:






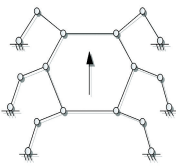
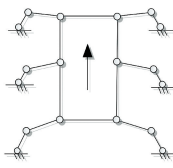
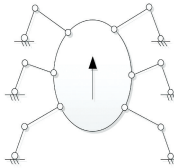
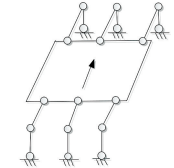
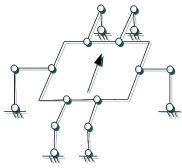
$$G_{Fi}^1(T_{ai} \ T_{bi} \ T_{ci}; R_{\alpha i} \ R_{\beta i} \ R_{\gamma i}).$$

式中, $T_{ki} (k=a, b, c)$ 和 $R_{ji} (j=\alpha, \beta, \gamma)$ 分别表示机器人的第 i 条腿足端的移动特征和转动特征。

由此可推断出六足机器人整机构型对机器人腿部自由度分配没有影响。进一步可得, 六足步行机器人整机构型的实质是解决机械腿在机身平台上的布局问题(不同的机械腿, 适用于不同的整机构型)。因此本文基于仿生学原理, 对六足动物(昆虫)和类六足动物(昆虫)进行系统的研究与总结, 发现六足动物的腿部布局主要有 5 种类型, 其具体形式如表 1 所示, 表中的生物类别为拥有该种腿部布局的典型生物类别。

表 1 六足机器人整机构型表

Tab. 1 Configurations of hexapod robot

物种	头足类软体动物 八腕目	鞘翅目昆虫 即甲虫	半翅目昆虫	螯肢动物 蛛形纲	全变态类 昆虫膜翅目
实例 图片					
整机构型					

注: 表中箭头方向为各构型的主运动方向

3 腿部机构介绍及整机坐标系建立

地球上所有动物的行走过程本质上是动物足端实现的空间 3 维移动。因此, 多足机器人的腿部 6 个自由度中至少包含 3 个主动自由度。图 1 所示为一种六足机器人腿部机构简图, 该腿部机构拥有 3 个自由度。从图中可得该腿部机构由驱动机构和行走机构串联而成, 其中, 驱动机构为 2RUS+RU 并联机构, 行走机构为 FD 机构(空间平行四边形机构), 二者通过中间球副 S 连接, 且足与地面的接触形式为点接触。在图 1 中,

$R_{Di} (i=1, 2, 3)$ 表示驱动转动副中心点, $U_i (i=1, 2, 3)$ 表示虎克铰中心点, $S_i (i=1, 2)$ 表示球副中心点, G 表示 RU 支链与动平台的固接点, S 表示连接球副中心点, 即行走机构的运动输入点, $R_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 表示行走机构的各杆件之间的转动副中心, H 表示行走机构与机架连接转动副中心点, C 表示足端点。设机构的主要几何参数为 $U_i S_i = l_i (i=1, 2), U_3 G = l_3, R_{Di} U_i = m_i (i=1, 2, 3), S_i G = a (i=1, 2), R_{D1} R_{D2} = b, R_4 R_1 = l_4, R_1 R_3 = l_5, R_1 R_2 = l_6, R_1 S = c, R_1 C = l_7, GS = l_8$ 。图中 $O_0-x_0 y_0 z_0$ 为腿部固定坐标系, 坐标原点位于 R_{D1} 和 R_{D2} 连线的中点, x_0 轴方向为从 R_{D2} 指向 R_{D1} 的方向, z_0 轴的方向为从 O_0 指向 R_{D3} 的方向,

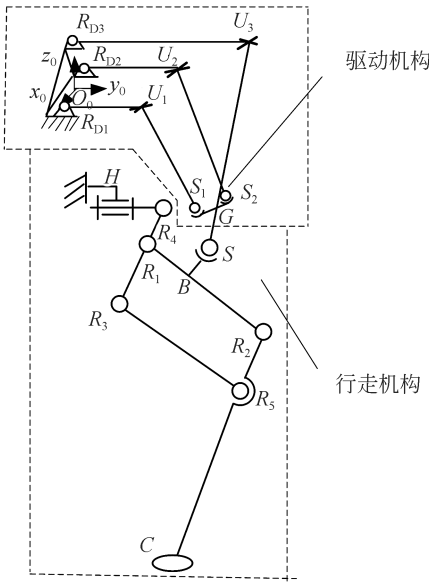


图 1 腿部机构简图

Fig. 1 Sketch of leg mechanism

y_0 轴由右手螺旋定则确定。

建立整机坐标系,如图 2 所示,坐标系 $G-x_G y_G z_G$ 表示地面坐标系 $\{G\}$,坐标原点 G 与机器人保持初始位置站立时六个足端点形成多边形的几何中心重合, z_G 轴方向为竖直向上, y_G 轴方向为机器人主运动(前进后退)方向, x_G 由右手螺旋定则确定。坐标系 $P-x_P y_P z_P$ 表示机身坐标系 $\{P\}$,坐标原点 P 与机器人机身中心点重合, z_P 轴方向为竖直向上, y_P 轴方向为机器人主运动方向, x_P 由右手螺旋定则确定。坐标系 $L_i-x_{L_i} y_{L_i} z_{L_i}$ 表示第 i 条支撑腿的连体坐标系 $\{L_i\}$,坐标原点 L_i 与第 i 条支撑腿和机身的连接点重合,其中该坐标系和图 1 中的腿部坐标系 $O_0-x_0 y_0 z_0$ 等价,为同一坐标系。

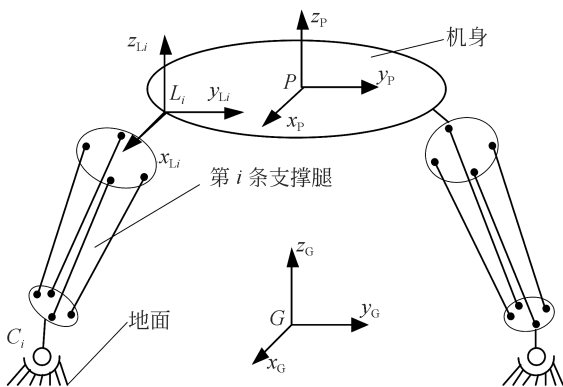


图 2 整机坐标系图

Fig. 2 Diagram of whole machine coordinate system

4 整机运动学模型建立

4.1 整机位置分析

整机的位置分析主要是建立机身参考点 P 在坐标系 $\{G\}$ 下的位置矢量和机器人 n 条支撑腿(假设在某一时刻该机器人的支撑腿数为 n ,且有 $n=3\sim 6$)中 $3n$ 个驱动转动副转角之间的关系。设该六足机器人 n 条支撑腿中,第 i ($i=1\sim n$) 条支撑腿足端点在坐标系 $\{G\}$ 中的位置矢量为 ${}^G C_i = [{}^G x_{C_i} \ {}^G y_{C_i} \ {}^G z_{C_i}]^T$ ($i=1\sim 6$)、在坐标系 $\{L_i\}$ 中的位置矢量为 ${}^{L_i} C_i$,机身中心点 P 在坐标系 $\{G\}$ 中的位置矢量为 ${}^G P = [{}^G x_P \ {}^G y_P \ {}^G z_P]^T$,机身相对地面坐标系的姿态角矢量为 ${}^G \psi_P = [{}^G \alpha_P \ {}^G \beta_P \ {}^G \gamma_P]$ 。第 i 条支撑腿的腿部坐标原点在坐标系 $\{P\}$ 中的位置矢量为 ${}^P L_i = [{}^P x_{L_i} \ {}^P y_{L_i} \ {}^P z_{L_i}]^T$ ($i=1\sim 6$)。

根据图 2 中各点之间的几何关系,在坐标系 $\{G\}$ 中建立向量 ${}^P C_i$ 、 ${}^P L_i$ 和 ${}^{L_i} C_i$ 之间的闭环矢量链,可得:

$${}^G ({}^P C_i) = {}^G ({}^P L_i) + {}^G ({}^{L_i} C_i), \quad i=1\sim n, \quad (1)$$

利用 XYZ 欧拉角描述机身姿态,可得姿态变化矩阵为:

$${}^G P R = \text{Rot}(x, {}^G \alpha_P) \cdot \text{Rot}(y, {}^G \beta_P) \cdot \text{Rot}(z, {}^G \gamma_P), \quad (2)$$

根据坐标变化关系,式(1)可以表示为:

$${}^G P R^{-1} ({}^G C_i - {}^G P) = {}^P L_i R \cdot {}^{L_i} C_i + {}^P L_i, \quad i=1\sim n, \quad (3)$$

式中, ${}^P L_i$ — 点 L_i 在坐标系 $\{P\}$ 中的位置矢量,

${}^P L_i R$ — 第 i 条支撑腿的坐标系相对于坐标系 $\{P\}$ 的姿态变换矩阵,为已知量。

由式(3)可得足端点在坐标系 $\{L_i\}$ 中的位置矢量为:

$${}^{L_i} C_i = {}^P L_i R^{-1} ({}^G P R^{-1} ({}^G C_i - {}^G P) - {}^P L_i), \quad i=1\sim n. \quad (4)$$

根据文献[24]可得,在第 i 条腿部坐标系 $\{L_i\}$ 中足端点位置矢量和驱动输入之间的关系为:

$${}^{L_i} \theta_q = f(C_i^{L_i}), \quad i=1\sim n, \quad (5)$$

式中, ${}^{L_i} \theta_q$ 表示在第 i 条腿部坐标系中的驱动输入量。

$f(C_i^{L_i})$ 表示自变量为足端位置矢量 $C_i^{L_i}$ 的函数。且有,

$${}^{L_i} \theta_q = [{}^{L_i} \theta_{q1} \quad {}^{L_i} \theta_{q2} \quad {}^{L_i} \theta_{q3}]^T. \quad (6)$$

4.2 整机速度及加速度分析

整机的速度与加速度分析主要是建立机身参考点 P 在地面坐标系下的速度和加速度矢量和机器人 n 条支撑腿中 $3n$ 个转动副的转动角速度与角加速度之间的关系。

4.2.1 整机速度分析

设机身的速度为 ${}^G\mathbf{V}_P = [{}^G\mathbf{v}_P \quad {}^G\mathbf{w}_P]^T$, 驱动副的输入速度为 ${}^n\boldsymbol{\omega}_q = [\omega_{q1}^1 \quad \omega_{q2}^1 \quad \cdots \quad \omega_{q3}^n]^T$ 。对式(4)求导, 可得第 i 条腿的足端相对于机身的速度为:

$${}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{v}_{Ci} = -{}^G\mathbf{v}_P - {}^G\mathbf{w}_P \times ({}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{C}_i), \quad (7)$$

将上式改写为

$${}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{v}_{Ci} = -\mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot {}^G\mathbf{v}_P + ({}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{C}_i) \times {}^G\mathbf{w}_P, \quad (8)$$

同时, 有

$${}^P\mathbf{C}_i = {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{C}_i + {}^P\mathbf{L}_i, \quad (9)$$

由坐标变换关系, 可知

$${}^P\mathbf{v}_{Ci} = {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{v}_{Ci}, \quad (10)$$

式中, ${}^P\mathbf{v}_{Ci}$ 和 ${}^L_i\mathbf{v}_{Ci}$ 分别为第 i 条支撑腿的足端相对于机身坐标系和其腿部坐标系的速度矢量。对于单腿足端速度和其驱动输入速度之间的映射关系可由文献[24]获得:

$${}^L_i\mathbf{v}_{Ci} = {}^L_i\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^i, \quad (11)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_q^i$ 表示第 i 条支撑腿的驱动副输入速度矢量。

联立式(7)~式(11)可得, 地面坐标系中的机身速度与第 i 条腿驱动输入速度之间的关系为:

$$({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{a}_{Ci} = -{}^G\mathbf{a}_P - {}^G\boldsymbol{\varepsilon}_P \times ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{C}_i - 2 \cdot {}^G\mathbf{w}_P \times ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{v}_{Ci} - {}^G\mathbf{w}_P \times {}^G\mathbf{w}_P \times ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{C}_i, \quad (16)$$

再令式(10)两端对时间求导可得,

$${}^P\mathbf{a}_{Ci} = {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{a}_{Ci}, \quad (17)$$

通过式(16)和(17)可得腿 i 足端点在腿部坐标系中的加速度和机身在地面坐标系中的加速度之间的关系为:

$$\begin{aligned} ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{a}_{Ci} = & [-\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{C}_i] \cdot {}^G\mathbf{A}_P, \\ & - 2 \cdot {}^G\mathbf{w}_P \times ({}^G\mathbf{R}) \cdot {}^P\mathbf{v}_{Ci} \end{aligned} \quad (18)$$

将与地面接触的 $n(n=3 \sim 6)$ 条腿分别建立与式(18)相同形式的方程, 并将其写成矩阵的形式为:

$$\begin{aligned} & {}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^i = \\ & -\mathbf{I}_{3 \times 3} \cdot {}^G\mathbf{v}_P + ({}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{C}_i) \times {}^G\mathbf{w}_P. \end{aligned} \quad (12)$$

引入反对称矩阵, 式(12)可以表示为矩阵形式:

$${}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^i = [-\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{K}_i] \cdot {}^G\mathbf{V}_P, \quad (13)$$

式中, \mathbf{K}_i 为向量 ${}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{C}_i$ 对应的反对称矩阵。

将与地面接触的 $n(n=3 \sim 6)$ 条腿分别建立上述形式的方程, 并将其写成矩阵的形式为:

$${}^P\mathbf{J}_1 \cdot {}^n\boldsymbol{\omega}_q = {}^P\mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{v}_P, \quad (14)$$

其中 ${}^P\mathbf{J}_1$ 和 ${}^P\mathbf{J}_2$ 的表达式如下

$$\begin{aligned} {}^P\mathbf{J}_1 = & \text{diag}({}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{J}_v^i), i=1 \sim n \\ {}^P\mathbf{J}_2 = & \begin{bmatrix} -\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{K}_1 \\ -\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{K}_2 \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{K}_n \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (15)$$

式中 ${}^P\mathbf{J}_1 \subseteq \mathbf{R}^{(3 \cdot n) \times (3 \cdot n)}$, ${}^P\mathbf{J}_2 \subseteq \mathbf{R}^{(3 \cdot n) \times 6}$

则在 $n(n=3 \sim 6)$ 条腿与地面接触情况下, 该机器人机身速度和驱动输入之间的映射关系矩阵为:

$${}^P\mathbf{J}_v = ({}^P\mathbf{J}_1)^{-1} \cdot {}^P\mathbf{J}_2. \quad (15)$$

4.2.2 整机加速度分析

设机身的加速度为 ${}^G\mathbf{A}_P = [{}^G\mathbf{a}_P \quad {}^G\boldsymbol{\varepsilon}_P]^T$, 在 n 条腿着地的情况下, 这 n 条腿的驱动副的输入加速度为 ${}^n\boldsymbol{\varepsilon}_q = [\varepsilon_{q1}^1 \quad \varepsilon_{q2}^1 \quad \cdots \quad \varepsilon_{q3}^n]^T$ 。

令式(7)两端对时间求导可得,

$$\mathbf{J}_{A1} \cdot {}^n\boldsymbol{\varepsilon}_q = \mathbf{J}_{A2} \cdot {}^G\mathbf{A}_P - 2 \cdot \mathbf{J}_{A3} \cdot {}^G\mathbf{w}_P, \quad (19)$$

其中, 对于单腿机构, ${}^L_i\mathbf{a}_{Ci}$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}_q^i$ 之间的映射关系可由文献[24]获得。

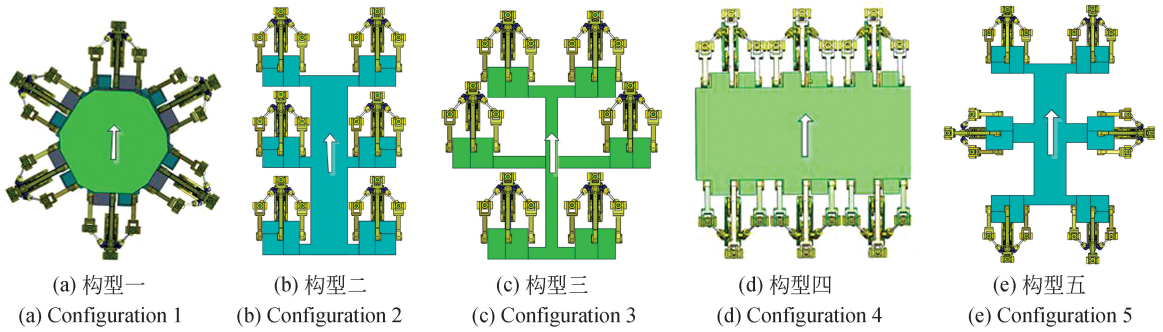
$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{A1} = & \text{diag}({}^G\mathbf{R} \cdot {}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R}), i=1 \sim n \\ \mathbf{J}_{A2} = & {}^P\mathbf{J}_2, \mathbf{J}_{A3} = \begin{bmatrix} {}^G\mathbf{R} \cdot ({}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_1\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^1) \times \\ {}^G\mathbf{R} \cdot ({}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_2\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^2) \times \\ \vdots \\ {}^G\mathbf{R} \cdot ({}^P\mathbf{L}_i \mathbf{R} \cdot {}^L_i\mathbf{J}_v^i \cdot \boldsymbol{\omega}_q^n) \times \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (20)$$

4.3 腿部布局介绍及整机运动学仿真

六足机器人机械系统既是由六条腿组成的并联系统, 也是各腿部连杆和机架组成的混联系统。

该系统的性能将受到腿部机构构型和腿部在机身上的布局(整机构型)的影响。也就是说,在腿部机构构型确定的情况下,整机构型设计就成为机器人设计的重要环节。它对机器人腿部运动性能及整机稳定性都有重要影响。在整机构型设计过程中

一般应该遵循的原则为:在满足总体尺寸和行走及作业稳定性的前提下,最大限度地发挥腿部机构的运动及承载能力。结合表 1 中的整机构型方式,基于本文提出的并联驱动腿部机构(2RUS+RU+FD),可得如图 3 所示的腿部布局。



注:箭头方向为整机的主运动方向。

图 3 基于并联驱动腿的六足机器人整机构型示意图

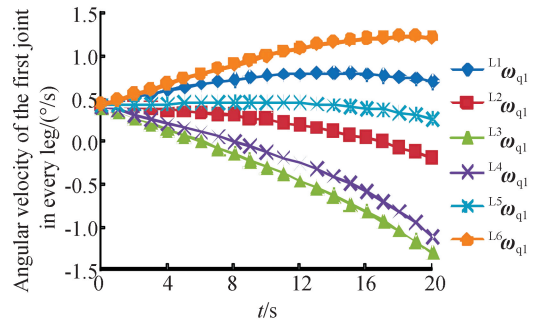
Fig. 3 Configuration diagram of six legged robot based on parallel-driving legs

以图 3 中构型 4 为例,利用 ADAMS 软件对该运动学理论模型进行仿真验证。设定腿部机构及机架的几何参数(单位,mm)分别为: $d = 276$, $h_1 = 70$, $a = 100$, $l_1 = l_2 = 200$, $l_3 = 250$, $l_{33} = 120$, $m_1 = m_2 = 200$, $m_3 = 370$, $c = 370$, $l_4 = l_5 = 200$, $l_6 = 300$, $l_7 = 450$, $l_y = 190$, $l_z = 55$, $l_g = 46.5$, ${}^P x_{L1} = {}^P x_{L6} = {}^G x_{C1} = {}^G x_{C6} = 450$, ${}^P x_{L2} = {}^P x_{L5} = {}^G x_{C2} = {}^G x_{C5} = 0$, ${}^P x_{L3} = {}^P x_{L4} = -{}^P x_{L1}$, ${}^P y_{L1} = {}^P y_{L2} = {}^P y_{L3} = 250$, ${}^P y_{L4} = {}^P y_{L5} = {}^P y_{L6} = -{}^P y_{L1}$, ${}^P z_{L_i} = {}^G z_{C_i} = 0$ ($i = 1 \sim 6$), ${}^G x_{C3} = {}^G x_{C4} = -{}^G x_{C1}$, ${}^G y_{C1} = {}^G y_{C2} = {}^G y_{C3} = 435.82$, ${}^G y_{C4} = {}^G y_{C5} = {}^G y_{C6} = -{}^G y_{C1}$ 。设定机身中心点 P 的运动函数为:

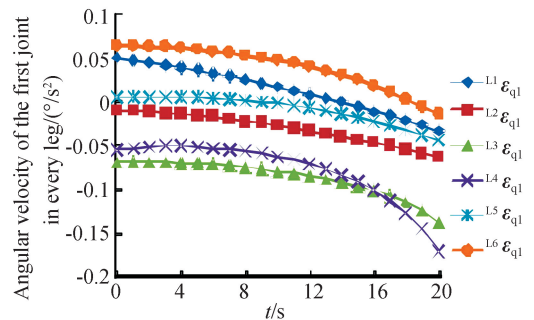
$${}^G \mathbf{P} = [0.3t^2 \quad 0.3t^2 \quad -3t + 900]^T,$$

$${}^G \boldsymbol{\psi}_P = [0.001t^2 \quad 0.005t^2 \quad 0.001t]^T, 0 \leq t \leq 20s \quad (21)$$

将式(21)中的函数作为仿真模型和理论模型的运动输入,可得机器人各支撑腿驱动关节的转动角速度、转动角加速度,分别如图 4 所示。为了精确说明理论计算的正确性,利用 excel 进行线性拟合^[25],拟合结果如图 5 所示。从图中拟合直线的斜率和速度计算值的范围可知:理论与仿真角速度值的最大误差量级为 $10^{-2} (^\circ)/s$,角加速度值的误差最大量级为 $10^{-3} (^\circ)/s^2$,从而说明理论推导的正确性。



(a)角速度
(a) Angular velocity



(b)角加速度
(b) Angular acceleration

图 4 六足机器人驱动副角速度、角加速度计算结果
Fig. 4 Angular velocity, angular acceleration theoretical and simulation results of hexapod robot

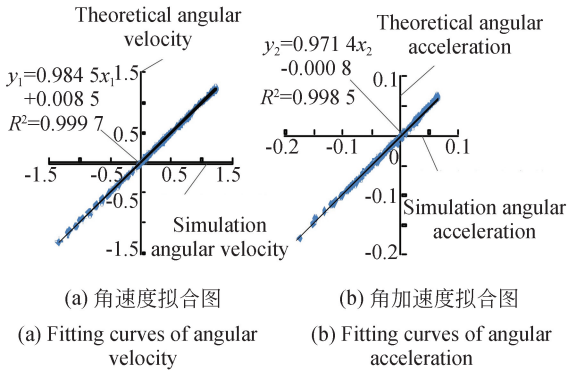


图 5 理论与仿真速度、加速度拟合图

Fig. 5 Fitting curves of theoretical and simulation angular velocity and acceleration

5 不同整机构型六足机器人运动性能对比分析

5.1 不同整机构型六足机器人工作空间分析

六足机器人作为一种运载平台或操作平台，其机身的工作空间对整个机器人的操作空间及调

姿能力都有很大的影响。从映射角度来说，机器人机身工作空间(包括位置工作空间和姿态工作空间)即为机器人各支撑腿工作空间在机身中心点的映射合集。不论在机械加工、消防、娱乐等何种领域，六足机器人的主要作业方式可以归为两种；行走和站立作业，其中站立作业由于其动作的复杂性和多样性，对机器人机身工作空间的要求较高。此外，由于六足机器人的工作环境随六足机器人的移动不断变化，时而宽敞，时而狭窄(如楼梯拐角、门道、丛林等)。因此在设计六足机器人的过程中需对其整体尺度加以限制。为了确定该并联驱动腿的整机布局形式，基于第 3 节所给的机构几何参数，本文以六足机器人站立状态为例，在六足机器人占地面积为 1.2 m×1 m，并考虑稳定性约束、各腿部机构运动副转角约束和杆件干涉约束的情况下，对图 3 中 5 种构型六足机器人的工作空间进行分析。图 6(彩图见期刊电子版)所示为 5 种构型的机身中心点可达位置的工作空间结果。

由图 6 可知，5 种构型下在 X-Y-Z 方向的工作范围分别为：构型一、720-540-455；构型二、784-

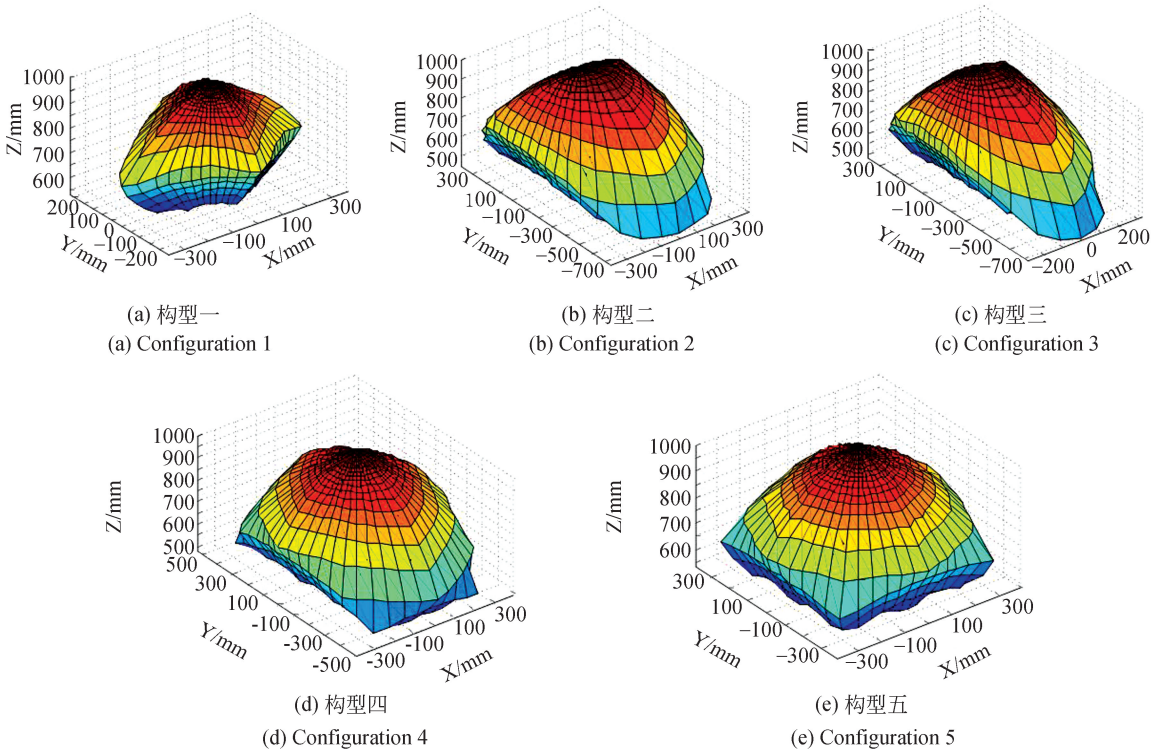


图 6 基于并联腿的 5 种整机构型下整机工作空间

Fig. 6 Workspace of robots with different configurations based on parallel-driving legs

1 046-558; 构型三、580-1 095-544; 构型四、784-1 120-580; 构型五、776-776-498。由此可得采用本文介绍的腿部机构工作时, 整机构型二、构型三和构型四的位置工作空间较大, 其中由于构型的相似性, 构型二和构型三工作空间形状相似。因此对于位置工作空间性能而言, 构型二、构型三和构型四均满足机器人运动要求。由于构型二和构型三的构型原理没有本质区别, 结构及运动性能相似, 因此本文在后续性能研究中主要对构型二和构型四的运动学性能进行对比分析。

对于姿态工作空间, 本文采用定位置下的姿态工作空间为研究对象, 对构型二和构型四的姿态工作空间展开分析。为了对两种构型下的姿态调整能力做出评价, 定义姿态调整能力评价指标 ZT :

$$ZT = V_{G_{P=X}}, \quad (22)$$

式中, $V_{G_{P=X}}$ 为机身中心点 G_P 在位置工作空间内任意点 X 处的姿态工作空间体积。

在两种构型下的位置工作空间内任意选取拥有相同坐标的 8 个点, 可得这 8 个点处 ZT 的值如图 7 所示。

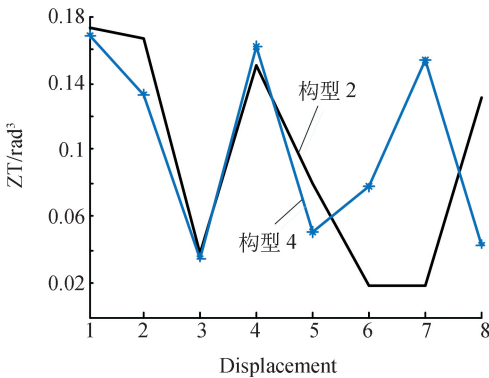


图 7 构型 2 和构型 4 下不同位置的 ZT 值

Fig. 7 ZT values of configuration 2 and configuration 4 under different positions

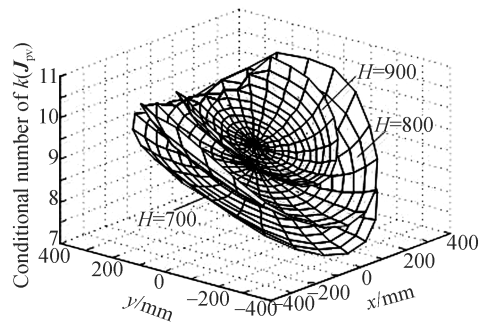
由图 7 得, 两种整机构型下的同一坐标点的姿态工作空间大小不同, 但通过每一构型下不同点处 ZT 的变化规律, 可得在这两种构型下基于该并联驱动腿的六足机器人姿态调整能力没有明显区别。

5.2 整机构型二和构型四下速度传递性能分析

为了评价基于该并联驱动腿的不同整机构型六足机器人线速度和角速度的传递性能, 根据

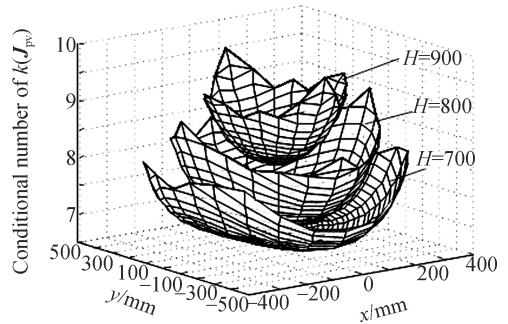
点 G_P 的速度 ${}^G v_P = [{}^G v_P \quad {}^G w_P]^T$ 的量纲, 将雅可比矩阵 ${}^P J_v$ 划分为线速度传递部分 J_{pv} 和角速度传递部分 J_{pw} , 其中 J_{pv} 和 J_{pw} 均为 $3n \times 3$ 矩阵。

雅克比矩阵条件数可以定量的反应机构输入输出之间的传递关系^[26]。本文利用 J_{pv} 和 J_{pw} 的条件数来评价不同构型下的速度传递性能。图 8 所示为构型二和构型四的 J_{pv} 的条件数在高度 H 分别为 700、800、900 mm 的分布图, 图 9 所示为构型二和构型四的 J_{pw} 条件数在高度 H 分别 700、800、900 mm 的分布图。



(a) 构型二

(a) Configuration 2



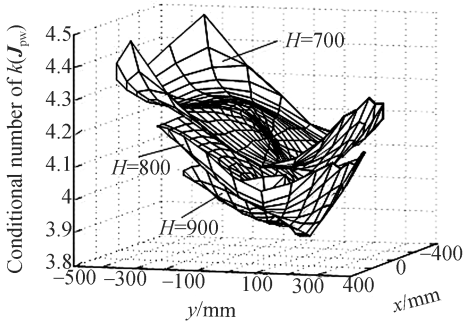
(b) 构型四

(b) Configuration 4

图 8 构型二、四的 J_{pv} 的条件数分布图

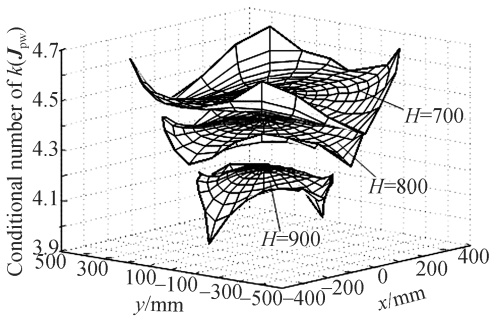
Fig. 8 Distribution of J_{pv} in configuration 2 and configuration 4

由图 8 可得, 对于构型二和构型四, 条件数均随高度 H 的增大而增大; 在同一 H 下, 构型二的条件数值比构型四下的条件数值略大; 同时, 构型四在各个方向上的条件数分布均衡性比构型二好。由图 9 可得, 对于构型二和构型四, 条件数均随高度 H 的增大而减小; 在同一 H 下, 构型二的条件数值比构型四下的条件数值略小; 且构型四



(a) 构型二

(a) Configuration 2



(b) 构型四

(b) Configuration 4

图 9 构型二、四的 J_{pw} 的条件数分布图Fig. 9 Distribution of J_{pw} in configuration 2 and configuration 4

在各个方向上的条件数分布均衡性比构型二好。

综上所述,构型四的整机构型方式更能发挥该并联驱动腿部机构的综合运动能力。图 10 为本项目组与上海交通大学联合开发的六足机器人样机。该机器人基于构型二,并同时考虑整机尺寸和制造工艺性。



图 10 六足机器人样机

Fig. 10 The hexapod robot

6 结 论

本文阐明了六足机器人整机构型设计的实质为解决机械腿在机身平台上的布局问题,给出了 5 种整机构型。建立了六足机器人整机运动学模型,并通过理论与仿真算例得到理论和仿真的最大误差量级分别为 $10^{-2} (^{\circ})/s$ 和 $10^{-3} (^{\circ})/s^2$,由此说明了理论模型的正确性。该运动学模型对其他六足机器人也具有普遍适用性。

对 5 种整机构型下的基于并联驱动腿六足机器人的工作空间进行对比,得出了整机构型二、三和四能够较好地发挥该腿部机构工作空间大的特点,适合作为基于该腿部机构的六足机器人整机构型。选取工作空间较大的构型二和构型四下的六足机器人,并对二者的运动性能包括姿态调整能力、速度传递特性进行对比分析,得出采用构型四的腿部布局形式更能发挥该并联驱动腿部机构的综合运动能力。

参考文献:

- [1] 高建设,李明祥,侯伯杰,等. 新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3147-3160.
GAO J SH, LI M X, HOU B J, et al.. Kinematics analysis on the serial-parallel leg of a novel quadruped walking robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3147-3160. (in Chinese)
- [2] 王国彪,陈殿生,陈科位,等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 27-44.

- WANG G B, CHEN D SH, CHEN K W, et al.. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 27-44. (in Chinese)
- [3] PORTA J M, CELAYA E. Reactive free-gait generation to follow arbitrary trajectories with a hexapod robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, 47(4): 187-201.
- [4] FIELDING M R, DUNLOP R, DAMAREN C J. Hamlet: Force/position controlled hexapod walker-Design and systems[C]. *The IEEE Conference on Control Applications, Mexico City, Mexico*,

- 2001:984-989.
- [5] WEIDEMANN H J, PFEIFFER F, ELTZE J. The six-legged TUM walking robot [C]. *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany*. 1994, 2: 1026-1033
- [6] BO J, CHENG C, WEI L, *et al.*. Design of the control system for a hexapod walking robot [C]. *IEEE International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), Zhangjiajie, P. R. China*, 2011:401-404.
- [7] 罗庆生,韩宝玲,赵小川,等. 现代仿生机器人设计 [M]. 北京:电子工业出版社. 2008.
- LUO Q SH, HAN B L, ZHAO X CH, *et al.*. *Modern Biomimetic Robots Design* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [8] CHEN F, ZANG X Z, YAN J H, *et al.*. Development of navigable hexapod biomimetic robot Spider [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011,41(3):765-770.
- [9] 荣誉,金振林. 五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1233-1242.
- RONG Y, JIN ZH L. Static performance evaluation and optimal design of 5-DOF parallel mechanical leg [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1233-1242. (in Chinese)
- [10] 荣誉,金振林,曲梦可. 六足步行机器人的并联机械腿设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1532-1541.
- RONG Y, JIN ZH L, QU M K. Design of parallel mechanical leg of six-legged robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1532-1541. (in Chinese)
- [11] De SANTOS P G, GARCIA E, COBANO J A, *et al.*. SILO6: A six-legged robot for humanitarian de-mining tasks [C]. *The International Conference on Word Automation Congress, Seville, Spain*, 2004: 523-528.
- [12] SKRZYPCZYNSI P. Laser scan matching for self-localization of a walking robot in man-made environments [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2012, 39(3): 242-250.
- [13] GORNER M, WIMBOCK T, HIRZINGER G. The DLR crawler: evaluation of gaits and control of an actively compliant six-legged walking robot [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, 36(4): 344-351.
- [14] CHAYOOTH T, TOMOHITO T, YASUSHI M, *et al.*. Stair recognition with laser range scanning by limb mechanism robot "ASTERISK"[C]. *The IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand*, 2009: 915-920
- [15] WILCOX B H, LITWIN T, BIESIADECKI J, *et al.*. ATHLETE: A cargo handling and manipulation robot for the moon [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(5):421-434.
- [16] PAN Y, GAO F. A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2014, 228(4):753-764.
- [17] 丁希仑,王志英,Alberto Rovetta. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动性能分析[J]. *机器人*, 2010, 32(6):759-765
- DING X L, WANG ZH Y, ALBERTO R. Typical gaits and motion analysis of a hexagonal symmetrical hexapod robot [J]. *Robot*, 2010, 32(6): 759-765. (in Chinese)
- [18] 张赫. 具有力感知功能的六足机器人及其崎岖地形步行控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013,43-49.
- ZHANG H. *Research on force sensing based hexapod robot and control for walking on uneven terrain* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013,43-49. (in Chinese)
- [19] 荣誉. 基于并联机械腿的六足机器人分析与设计 [D]. 燕山:燕山大学, 2015, 118-120.
- RONG Y. *Analysis and design for hexapod robots with parallel mechanical legs* [D]. Yanshan: Yanshan University, 2015, 118-120. (in Chinese)
- [20] 潘阳. P-P 结构六足机器人性能设计与控制实验研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2014, 55-60
- PAN Y. *Performance design and control experiment of a novel hexapod robot with P-P structure* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014, 55-60. (in Chinese)
- [21] 顾茂彬,陈仁利. 昆虫文化与鉴赏 [M]. 广东:广东科技出版社. 2011.
- GU M B, CHEN R L. *Culture and Appreciation of Insects* [M]. Guangdong: Science and Technology Press of Guangdong, 2011. (in Chinese)
- [22] 尹文英,宋大祥,杨星科,等. 著. 六足动物(昆虫)系统发生的研究 [M]. 北京:科学出版社. 2008.
- YIN W Y, SONG D X, YANG X K, *et al.*. *Research on the Occurrence of Six Legged Animal (insect) System* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

- [23] GAO F, YANG J L. *Topology Synthesis for Parallel Robotic Mechanisms* [M]. Warsaw: CAS publications, 2013.
- [24] 张金柱, 金振林, 陈广广. 六足步行机器人腿部机构运动学分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9), 45-52.
ZHANG J ZH, JIN ZH L, CHEN G G. Kinematic analysis of leg mechanism of six-legged walking robot [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering*, 2016, 32(9): 45-52. (in Chinese)
- [25] 刘渊. 误差理论与数据处理[D]. 大连: 大连理工大学, 2008, 26-39.

大学, 2008, 26-39.

LIU Y. *Error Theory and Data Processing* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008, 26-39. (in Chinese)

- [26] 董成林, 刘海涛, 黄田. 含冗余驱动支链 4-UPS & UP 并联机构的运动学性能分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 124-129.

DONG CH L, LIU H T, HUANG T. Kinematic performance analysis of redundantly actuated 4-UPS & UP parallel manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(5): 124-129. (in Chinese)

作者简介:



张金柱(1989—), 男, 山西朔州人, 博士研究生, 2013 年于燕山大学获得学士学位, 主要从事多足机器人设计理论与应用技术研究。E-mail: ysuzhangjz@126.com

通讯作者:



金振林(1962—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人设计理论与应用技术。E-mail: zljin@ysu.edu.cn