

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.006

基于2UU-UPU并联机构的4足机器人设计

贾云博, 许勇*, 杜静恩, 施浩然, 赖磊捷, 徐蕊

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对串联4足机器人负载能力低及由误差累积导致的控制精度低的问题,课题组采用2UU-UPU并联机构作为4足机器人大腿基本构型,并在动平台上添加一长杆作为小腿结构设计了新型4足机器人。首先基于修正的 Kutabach-Grübler 公式计算单腿机构的自由度并进行验证;其次利用几何关系求解该结构的逆解表达式;然后基于结构的约束条件,借助 MATLAB 软件求得该并联机构的工作空间;接着在 SolidWorks 中建立4足机器人的三维模型;最后进行4足机器人的步态规划和仿真分析。结果表明:该机构工作空间大,运动平稳,控制方便,适合作为4足机器人腿部结构。该研究在工程上有一定的实用性。

关键词:并联机构;4足机器人;工作空间;Kutabach-Grübler 公式;MATLAB 软件

中图分类号:TH112;TP242.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)01-0028-07

Design of Quadruped Robot Based on 2UU-UPU Parallel Mechanism

JIA Yunbo, XU Yong*, DU Jingen¹, SHI Haoran, LAI Leijie, XU Rui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai university of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the shortage of low load capacity and low control accuracy caused by error accumulation of the series quadruped robot, the 2UU-UPU parallel mechanism was adopted as the basic configuration of the robot thigh, and a long rod was added on the moving platform as the leg structure to design a novel quadruped robot. Firstly, based on the modified Kutabach-Grübler formula, the degree of freedom of the single leg mechanism was calculated and verified. Secondly, the inverse solution expression of the structure was solved by using the geometric relationship. Based on the constraint conditions of the structure, the workspace of the parallel mechanism was obtained by using MATLAB software. Then, the three-dimensional model of the quadruped robot was established in SolidWorks. Finally, the gait planning and simulation analysis of the quadruped robot were carried out. The results show that the mechanism has large working space, smooth motion and convenient control, which is suitable for the leg structure of quadruped robot. The research has a certain engineering practicability.

Keywords: parallel mechanism; quadruped robot; workspace; Kutabach-Grübler formula; MATLAB

随着科学技术的发展,一些危险环境下的工作和人类无法完成的任务都可以由机器人来替代。足式机器人是模仿动物的运动模式来进行设计的,足尖可以在工作空间内选择合适的支撑点,在多种地形有着良好的通过性,在复杂地形中能以合适的步态稳定行走。而多足机器人中,4足机器人由于其稳定性好,负载能力强,适应性良好,成为发展前景非常广阔的特种机器

人之一,广泛应用于抢险救灾、军事侦查、地质探测和智能服务等领域^[1-2]。因此近年来很多学者和研究机构针对4足机器人进行了深入的研究。

美国波士顿动力公司研制的 Big Dog 4 腿机器人^[3-4],可以承载重物,且具有较快的移动速度和较强的平衡能力,最初设计目的是用于军事方面。日本东京工业大学 Ota 研发了一种轻量化的并联移动机器人

收稿日期:2020-07-17;修回日期:2021-11-20

基金项目:上海市自然科学基金(21ZR1426000)。

第一作者简介:贾云博(1997),男,江苏昆山人,硕士研究生,主要研究方向为机器人机构学。通信作者:许勇(1974),男,江苏南通人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机器人机构学。E-mail:bruceyuyong@163.com

Para-walker^[5],采用串并混联机构使其具有更大的工作空间和更稳定地移动。北京理工大学王军政等研发的哪吒4足机器人^[6],采用了6-SPS并联机构设计腿部结构,并将动平台作为移动机器人的足端。由于6-SPS并联机构具有6个自由度,因此哪吒机器人具有很高的自由度与灵活性,但是由于每条腿都有6个自由度,所以至少需要6个驱动来实现运动,控制难度较高。

目前,4足机器人的研究向高负载、高灵活性和高智能化发展。已有的大多数4足机器人采用串联腿的设计结构,优点是灵活性好,缺点是负载方面存在不足。课题组提出一种将并联机构2UU-UPU作为腿部基本构型的4腿机器人,使其具有负载大、环境适应性强的特点。以此为研究目标,首先对单条腿中的并联机构进行自由度分析,建立坐标系以及求该机构的逆解表达式;进而求得该机构的工作空间,验证该机构作为腿部运动构件的可行性;最后进行4足机器人的步态规划和仿真分析。因此,该课题的研究具有重要价值和工程实际意义。

1 4足机器人新型并联腿机构构型

课题组提出的4足机器人新型并联腿机构如图1所示。它包括大腿和小腿2部分:大腿部分由2UU-UPU并联机构组成,包括1个与机器人身体相连的上平台,1个与小腿固接的下平台,上下平台为2个全等的等边三角形,上下面之间有3条支链,包含1个UPU

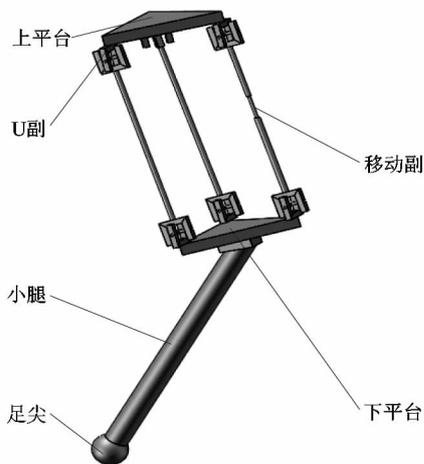


图1 新型并联腿机构三维构型
Figure 1 3D configuration of new parallel leg mechanism

支链和2个UU支链;小腿与下平台的夹角为45°。采用至少3个电机对该腿部结构进行驱动:其中1个位于驱动UPU支链的P副沿着杆长方向移动;另外2个设置在2个UU支链靠近上平台的U副上,2个电机的驱动方向是垂直的。

4足机器人的关节配置对于整个机器人的性能起至关重要的作用,合理的关节配置可以让4足机器人的稳定性更好,灵活性更高,复杂地形适应能力也会更强。目前有如下4种关节配置方式:①前后膝式;②前膝后肘式;③前后肘式;④前肘后膝式。如图2所示。4种结构各有利弊,可根据不同的需求选用不同的结构。根据前人的研究^[7-8],前肘后膝式结构紧凑,足底与地面的滑动较小,灵活性较高,适合大负载结构,因此选择前肘后膝式。

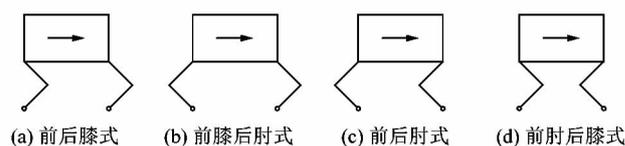


图2 4足机器人腿部关节配置

Figure 2 Joint configurations of quadruped robot legs

2 并联腿机构自由度计算

据Grubler-Kutzbach准则^[9],自由度求解公式为:

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

式中: d 为阶数,取值5; n 为构件数,取值6; g 为运动副数,取值7; f_i 为第 i 个运动副的自由度数, v 为冗余自由度,取值0; ζ 为局部自由度,取值0。

对于2UU-UPU机构,虎克副的自由度为2,移动副的自由度为1,将以上的数据代入式(1)中可以得出 $F=3$ 。即2UU-UPU机构的自由度为3,该2UU-UPU并联机构的自由度始终为2个转动加1个移动。

3 位置逆解求解

图3为并联腿的几何模型。在 A_1 点处建立空间直角坐标系 $O-XYZ$, X 轴与 A_1A_2 平行,上平台在 $O-XY$ 面内, Z 轴与 $O-XY$ 面垂直;移动坐标系 $o-xyz$ 位于足尖的中心,其中 x 轴与 B_1B_2 平行, z 轴沿 co 方向。 co 与平面 $B_1B_2B_3$ 的夹角 α 为45°,并且在点 c 处与 B_3D 相

交,点 D 是 B_1B_2 的中点。2-UU-UPU 并联腿的逆运动学是通过已知足尖的坐标 $o = (x_0, y_0, z_0)$ 的情况下求输入参数,即 U 副在 2 个互相垂直方向上的转动角度和移动副 P 的移动距离。

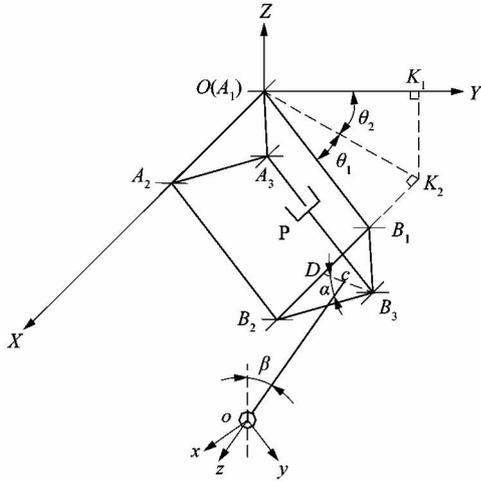


图3 并联腿机构的运动学模型

Figure 3 Kinematic model of parallel leg mechanism

A_3 在空间直角坐标系 $O-XYZ$ 中坐标可表示为

$$A_3 = (l_1/2, \sqrt{3}l_1/2, 0) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 2l_2y_0 \cos \theta_1 + (-2l_2x_0 - l_1l_2) \sin \theta_1 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + l_1x_0 - l_3^2 + 1/4l_1^2 + l_2^2 + \sqrt{6}/4l_1l_3; \\ m_2 &= 4l_2z_0 \cos \theta_1; \\ m_3 &= -2l_2y_0 \cos \theta_1 + (-2l_2x_0 - l_1l_2) \sin \theta_1 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 + l_1x_0 - l_3^2 + 1/4l_1^2 + l_2^2 + \sqrt{6}/4l_1l_3. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

B_3 和 D 在基坐标系中的坐标可表示为:

$$B_3 = \left(x_0, y_0 + l_3 \sin \beta + \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right), z_0 + l_3 \cos \beta - \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right); \quad (8)$$

$$D = \left(x_0, y_0 + l_3 \sin \beta - \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right), z_0 + l_3 \cos \beta + \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right). \quad (9)$$

式(4)和式(9)是 D 点坐标在不同坐标系中的表示方法,因此可求得 β 。可由 $\|B_3 - A_3\| = d_1$ 求得

$$d_1 = \sqrt{(x_0 - l_1/2)^2 + \left(y_0 + l_3 \sin \beta + \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) - \frac{\sqrt{3}l_1}{2} \right)^2 + \left(z_0 + l_3 \cos \beta - \frac{\sqrt{3}l_1}{4} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right)^2} \quad (10)$$

由式(5)、(6)和(10)可知,在足尖运动轨迹给定的情况下可求得驱动函数。

4 并联腿机构足端工作空间求解

机器人的工作空间是指机器人末端执行器上的参考点(即图3中 o 点)所能达到的空间点的集合。对于足式机器人来说,求解工作空间是一项十分重要的

指标,直接影响到机器人的运动性能,根据得到的工作空间的形状来判断腿部构型是否达到机器人的运动要求。机器人的工作空间有3种类型:可达工作空间、灵巧工作空间和全工作空间^[10]。后续的研究需要考虑到足尖所能达到的最大运动范围,因此课题组选用可达工作空间;基于求得的运动学逆解,在 MATLAB 中

式中: l_1 为上下平台 2 个全等等边三角形的边长, A_3 为上平台与移动副相接的 U 副中心点。

U 副在 2 个互相垂直方向上的转动角度为 θ_1 和 $\pi/2 - \theta_2$,因此可求得 B_1 点的坐标:

$B_1 = (l_2 \cdot \sin \theta_1, l_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2, l_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2)$ 。

式中: l_2 为 A_1B_1 和 A_2B_2 的长度, θ_1 为 A_1B_1 到面 $O-ZY$ 的夹角, θ_2 为 A_1B_1 到面 $O-XY$ 的夹角。

由 B_1 知 D 点的坐标为

$$D = (l_2 \sin \theta_1 + l_1/2, l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2, l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2) \quad (4)$$

足尖 o 和 D 在 X 轴上的坐标相同,根据 $x_{B_1} + l_{B_1D} = x_0$ 可得

$$\theta_1 = \arcsin \frac{x_0 - l_1/2}{l_2} \quad (5)$$

在三角形 oDc 中, l_3 为 oc 的长度,根据三角关系,

$\|o-D\| = \sqrt{l_3^2 + 3/16l_1^2 - \sqrt{6}/4l_1l_3}$ 可求解得到 θ_2 :

$$\theta_2 = 2 \arctan \frac{m_2 + \sqrt{m_2^2 - 4 \cdot m_1 \cdot m_3}}{2 \cdot m_1} \quad (6)$$

其中:

指标,直接影响到机器人的运动性能,根据得到的工作空间的形状来判断腿部构型是否达到机器人的运动要求。机器人的工作空间有3种类型:可达工作空间、灵巧工作空间和全工作空间^[10]。后续的研究需要考虑到足尖所能达到的最大运动范围,因此课题组选用可达工作空间;基于求得的运动学逆解,在 MATLAB 中

利用坐标搜索法求解并联腿的工作空间。

4.1 工作空间求解步骤及参数设定

在求解该并联机构的工作空间前,首先要确定其结构约束条件和设定必要的结构参数,在约束条件的范围内进行搜索。

1) 参考4足动物的关节比例,将腿部的2个关节设计为等长结构,根据设计目标可得腿部结构参数: $l_1 = 5 \text{ cm}, l_2 = l_3 = 40 \text{ cm}$ 。

2) 由结构参数和运动学逆解,并经调试后确定 X 、 Y 和 Z 轴搜范围为: $-40 \text{ cm} \leq X \leq 50 \text{ cm}$, $-60 \text{ cm} \leq Y \leq 40 \text{ cm}$, $-90 \text{ cm} \leq Z \leq 0 \text{ cm}$,搜索步长为 1 cm 。

3) 由于腿部机构的结构较为紧凑,为避免运动过程中发生干涉,限定 θ_1 的活动范围为 $-9\pi/20 \leq \theta_1 \leq 9\pi/20$, θ_2 的活动范围为 $19\pi/20 \leq \theta_2 \leq \pi/20$ 。

4) 为保证腿部与身体垂直的方向上有较大的运动范围, A_3B_3 上移动副 d_1 的搜索范围为 $35 \text{ cm} \leq d_1 \leq 45 \text{ cm}$ 。

5) 另外足尖的高度不应高于 B_2 点的高度,因此 $z \leq l_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2$ 。

4.2 足端工作空间求解结果

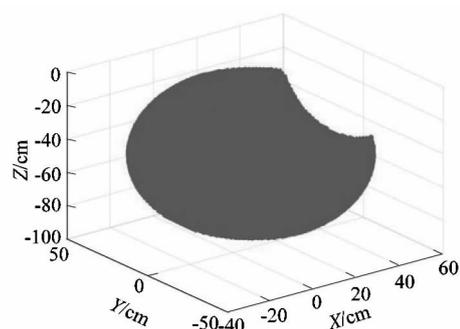
结合运动学逆解式(5),(6)和(10),使用边界搜索算法,并输入参数和约束条件,在MATLAB中进行编程可以得到图4所示的4足机器人单足工作空间及其在3个坐标平面上的投影。

图4(a)为4足机器人单足工作空间;图4(b)为工作空间在 XOY 面上的投影;图4(c)为工作空间在 ZOY 面上的投影;图4(d)为工作空间在 ZOX 面上的投影。从图中可以看出,腿部工作空间形状饱满,在 XYZ 轴上的工作长度较大,适合于并联机械腿实现多种形式的步态,在行走时可以实现较高的抬腿高度和较大的步长。

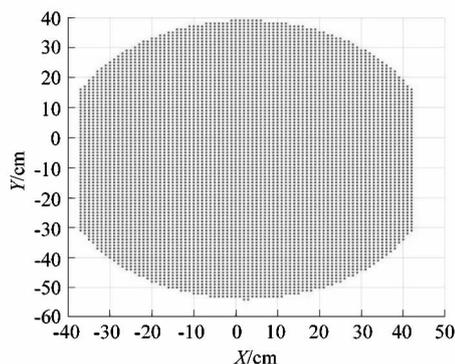
5 步态规划与仿真

5.1 4足机器人建模

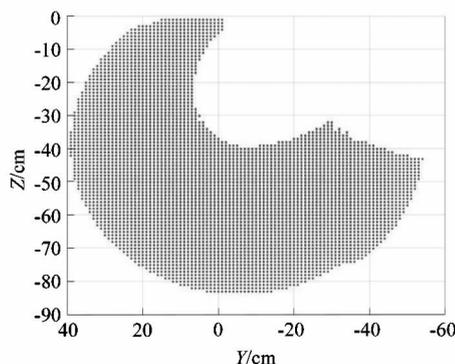
在SolidWorks三维建模软件中建立4足机器人的模型,为了使仿真更方便,求解速度更快,因此要对4足机器人的结构模型进行简化。图5所示为能满足腿部并联机构运动特征的4足机器人模型,由身体部分、左前腿、左后腿、右前腿和右后腿组成。对模型进行材



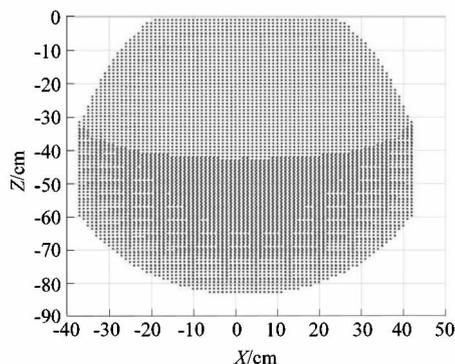
(a) 三维工作空间



(b) XY平面工作空间



(c) YZ平面工作空间



(d) XZ平面工作空间

图4 并联腿机构足端工作空间

Figure 4 Foot workspace of parallel leg mechanism

料设定,并将模型以 x_t 格式进行保存,为下一步在 ADAMS 软件中进行虚拟样机仿真做准备。

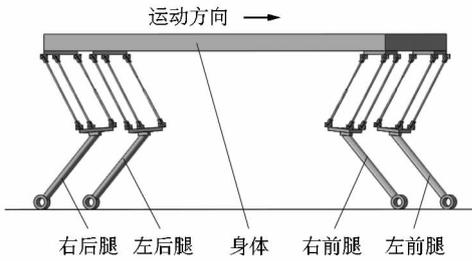


图5 4足机器人模型

Figure 5 Quadruped robot model

5.2 4足机器人步态规划

为了满足4足机器人在不同环境下能稳定移动,需要采用不同的步态。常用的步态有三角步态、对角步态、溜蹄步态和跑跳步态等^[11]。在较为平坦的路面上行走时,对角步态较为常用,可以提高机器人的行进速度,并且具有良好的稳定性。在对角步态中,机器人的迈腿顺序为:右前腿和左后腿同时迈出1步,落地之后,左前腿和右后腿再同时迈出,同样的迈腿方式循环下去,就构成了对角步态。

4足机器人对角步态示意图如图6所示,箭头所指为机器人运动方向, L_1, L_2, R_1 和 R_2 分别为左前腿、左后腿、右前腿和右后腿,虚线为前一步的动作,从图6(a)到图6(b)为 L_2 和 R_1 向前运动, L_1 和 R_2 此时为支撑腿;从图6(b)到图6(c)为 L_1 和 R_2 向前运动, L_2 和 R_1 此时又为支撑腿。在对角步态中,由于运动时误差的出现,以及环境的影响,整个机器人的质心无法始终处于机身的对角线上^[12],需要仿真分析来验证其稳定性。

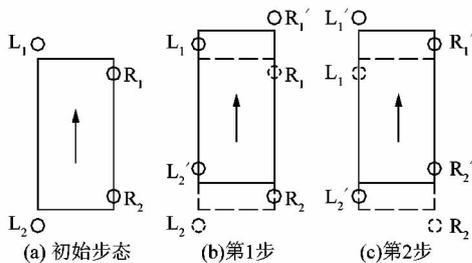


图6 4足机器人对角步态示意图

Figure 6 Diagonal gait of quadruped robot

为了使足端在与地面接触时不产生滑动,以及具有较小的反作用力,抬腿和落地时的速度应为0,因此在Y轴方向(即机器人运动方向)上采用复合摆线进行足尖步态规划^[13],4足机器人摆动腿的足端轨迹为:

$$x(t) = S(t/T - 1/(2\pi) * \sin(2\pi t/T)) - 20; \tag{11}$$

$$z(t) = H(1/2 - 1/2 * \cos(2\pi t/T)) - 70. \tag{12}$$

式中: S 为4足机器人的步长, H 为抬腿高度, t 为采样时间, T 为步态周期。

根据求得的机器人单足工作空间,设 $S = 35 \text{ cm}$, $H = 20 \text{ cm}$, $T = 0.4$,在MATLAB中画出摆动腿的轨迹,如图7所示。支撑腿与地面无滑动的前提下,推动机器人身体向前移动,此时支撑腿足端轨迹反向水平后移,因此其在Z轴方向上的位移始终为0,可利用机器人逆运动学获得各驱动的驱动函数。

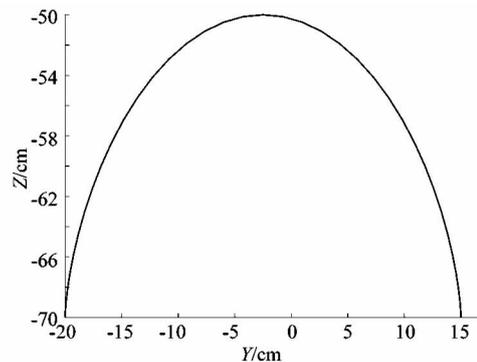


图7 并联腿机构足端轨迹规划

Figure 7 Foot trajectory planning of parallel leg mechanism

5.3 虚拟样机仿真与分析

将5.1节所述的4足机器人模型导入ADAMS,建立虚拟样机模型,如图8所示。根据机构的运动关系,添加53个运动副和约束,以及12个驱动,4足机器人在环境中受到重力和与地面的相互作用力,因此设置每1kg物体重力大小为9.8N,方向沿Z轴正方向,在足端和地面之间建立接触力,接触力参数设置如图9所示。

在每条腿动平台上的U副以及移动副上添加驱动以及驱动函数,开始进行仿真。仿真结束后,在后处理模块中可以获得仿真结果并输出仿真曲线。4足机

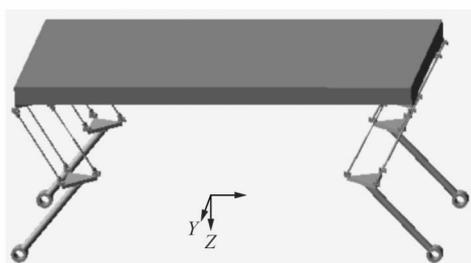


图8 4足机器人虚拟样机模型

Figure 8 ADAMS model of quadruped robot

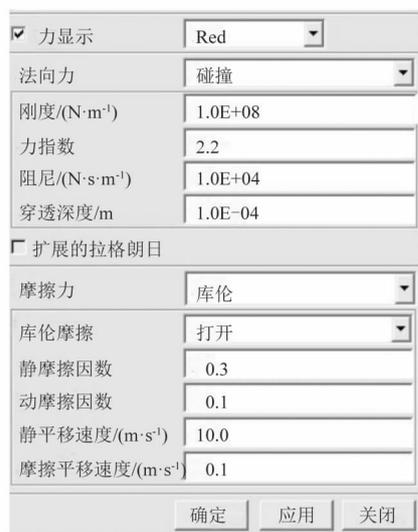


图9 接触力参数设置

Figure 9 Contact force parameter setting

机器人的质心在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴 3 个方向的位移曲线分别如图 10 所示。 X 轴方向为机器人的前进方向,可以看出前进位移轨迹增长比较平稳,质心在 Y 轴和 Z 轴方向有一定的波动,波动幅度较小,说明整个运动过程机器人可以稳定行走。

6 结论

课题组设计了一种基于 2UU-UPU 并联腿结构的新型 4 足机器人,通过对 2 转动 1 移动自由度的驱动,使腿部具有较高的灵活度,控制也较为方便。通过运动学逆解,以及单腿结构工作空间的分析,证明了该机构作为 4 足机器人腿部结构具有理想的工作空间,为进一步进行步态设计及优化奠定了基础。利用 ADAMS 对所设计的新型 4 足机器人进行动力学仿真,结果表明驱动函数以及步态规划合理,可以达到稳定

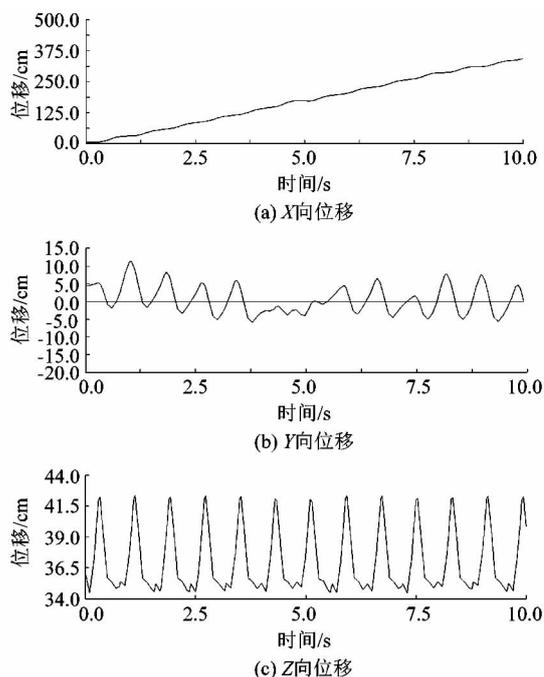


图10 机器人整体质心位移仿真曲线

Figure 10 Displacement simulation of global centroid of quadruped robot

行走的目的。

后续可针对多模式步态以及控制函数的优化进行研究,以应用于资源探测、危险环境采样等多种环境工作。因此利用 2UU-UPU 结构作为腿部的 4 足机器人具有进一步研究的价值。

参考文献:

- [1] 李瑞琴,郭为忠. 现代机构学理论与应用研究进展[J]. 北京:高等教育出版社,2014:10.
- [2] 王鹏,董人全,孙铁成,等. 四足机器人爬行凸起上坡的运动仿真研究[J]. 机电工程,2021,38(5):639-644.
- [3] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Big dog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2):10822-10825.
- [4] PLAYTER R, BUEHLER M, RAIBERT M. Bigdog[C]// Unmanned Systems Technology VIII. Orlando, USA: SPIE, 2006:623020.
- [5] OTA Y, YONEDA K, ITO F, et al. Design and control of 6-DOF mechanism for twin-frame mobile robot [J]. Autonomous Robots, 2001, 10(3):297-316.
- [6] PENG H, WANG J Z, SHEN W, et al. Cooperative attitude control for a wheel-legged robot [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2019, 12(6):1741-1752.

(下转第 42 页)