

自重构仿生四足机器人运动学分析及仿真

陈刚,东辉

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:自重构模块化机器人是由多个相同的单元模块构成,可以在复杂环境中独立完成各种构型和工作姿态。在分析自重构模块化机器人单元模块机构的基础上,提出一种由 10 个相同单元模块构成的自重构仿生四足机器人,建立其运动学模型,运用 D-H 法推导出该机器人的正运动学和逆运动学方程,将设计出的机器人三维模型导入 Adams/view 中进行运动仿真分析,验证该机器人运动的可行性与设计的合理性。

关键词:自重构;单元模块;仿生;四足机器人;运动学

中图分类号:TP242.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0095-04

The Kinematic Analysis and Simulation of Self-reconfigurable Four-legged Robot

CHEN Gang, DONG Hui

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Self-reconfigurable modular robot composed of multiple identical units and modules can conduct various configurations and working attitude independently in complex environment. According to the analysis of unit module mechanism, a new type of four reconstruction bionic quadruped robot including ten duplicate units modules was proposed. A kinematic model of the bionic quadruped robot was first established. The forward kinematics and inverse kinematics of the reconstructed bionic quadruped robot were then derived by D-H method. And the designed 3D model of the robot was imported into Adams/view for motion simulation analysis to verify the rationality of the design and the feasibility of motion of the self-reconstructed bionic quadruped robot.

Keywords: self-reconstruction; unit module; bionic; four-legged robot; kinematics

0 引言

自重构模块化机器人是在可重构模块化机器人的基础上衍生出更加智能化、适应性更强的模块化机器人,每个模块都具有独自的控制系统、通讯系统和处理信息的能力,它可以在复杂环境中独立完成机器人的构型和工作姿态,相比传统机器人更具有独立性、灵活性和广泛的应用性,可应用到野外作业、井下搜救及管道清理等复杂环境中。多个相同单元模块可以组成环形机器人^[1]、四足机器人等构型的仿生机器人。目前模块化机器人与其他机器人相结合构成仿生机器人是一个很热门的研究课题,如国外的 SMORES^[2]、国内的 Trimobot 等自重构模块化机器人^[3]都与移动机器人相结合构建多足仿生机器人^[4]。

本文中自重构模块化机器人单元模块有三个自由度,在构成仿生四足机器人时,单元模块自由度有不同的功能,如有些自由度可以构成仿生四足机器人的腕关节、膝关节等。根据单元模块的机构理念,提出一种自重构仿生四足机器人。该仿生机器人是由多个相同的单元模块构成,在仿生四足机器人某个关节出现问题需要更换时,模块化便于更换,节约时间。运用 D-H 法转换对仿生四足机器人正逆运动学求解进行了分析,通过对仿生四足机器人进行运动仿真,验证了仿生四足机器人设计的合理性与

理论推导的正确性。

1 单元模块与自重构仿生四足机器人特性描述

1.1 单元模块的特性描述

根据自重构模块化机器人模块之间的相互连接及关节自由度的分配,提出一种三自由度模块化设计。模块外观与内部结构如图 1 和图 2 所示,单元模块的尺寸为 150 mm×110 mm×110 mm。主要由单元模块机体结构和连接结构构成。单元模块机体有三个自由度,分别为上摆动自由度、下摆动自由度与中间的旋转自由度。上、下摆角为±70°,中间的旋转角为 360°,三个自由度相互独立。连接结构分为主动连接面和被动连接面,且安装在上、下摆杆的尺寸相同,主、被动连接面可以安装在任意摆杆上。一般情况下,下摆杆安装被动连接面,上摆杆安装主动连接面。连接方式为插销式连接。

1.2 自重构仿生四足机器人的特性描述

自重构仿生四足机器人是由 10 个单元模块构成,如

基金项目:国家自然科学基金项目(51605092);福建省科技计划重大项目(2014H2004)

第一作者简介:陈刚(1991—),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为自重构模块化机器人的设计。

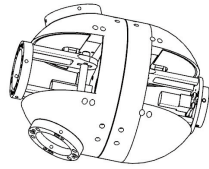


图1 单元模块外观图

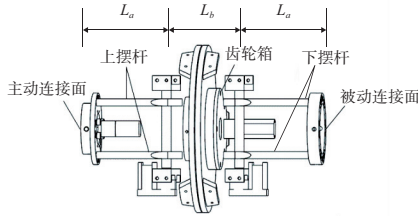


图2 单元模块内部结构图

图3所示,该仿生四足机器人每条机械腿由两个单元模块构成,机体由两个模块构成,其中机体单元模块6的上、下摆杆安装主动连接面,单元模块3的上、下摆杆安装被动连接面,便于仿生四足机器人机体的对称性,其他单元模块都是上摆杆安装主动连接面,下摆杆安装被动连接面。仿生四足机器人单元模块之间所有连接方式均为主动、被动面连接。仿生四足机器人是以“腿 III—腿 I—腿 IV—腿 II”顺序进行运动的。

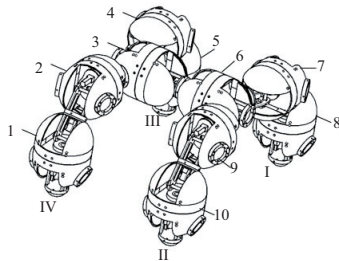


图3 仿生四足机器人结构图

机械腿 IV 由单元模块 1 和模块 2 所构成,每个单元有三个自由度,即共有六个自由度,如果每个自由度都运动,则产生多余的能量消耗与运动的冗余,且计算复杂。考虑这些因素,对自由度进行简化处理,假设单元模块 1 的下摆杆和中间自由度与模块 2 的中间自由度视作刚体。单元模块 2 的上摆杆自由度与四足机器人的机体连接,简化后的机械腿有三个自由度,其他机械腿的自由度简化与机械腿 IV 一样。每个机械腿足端装配一个半圆形橡胶垫,减少与地面的冲击力。

2 仿生四足机器人运动学分析

2.1 运动学建模

以机械腿 IV 为例,对自重构仿生四足机器人进行运动学分析。把机械腿各关节简化为连杆机构,在机器人机体与机械腿的各关节建立坐标系,如图 4 所示。机器人坐标系 $O_c - x_c y_c z_c$ 建立在机体上,原点为机体质心点, y_c 正向为机体移动的方向, z_c 的反向为重力方向。坐标系

$O_0 - x_0 y_0 z_0$ 建立在机体与机械腿连接的关节处,原点 O_c 在机体中的坐标为 (a, b, c) 。坐标系 $O_3 - x_3 y_3 z_3$ 建立在机械腿足端与地面接触处。机械腿 IV 各关节参数如表 1 所示。

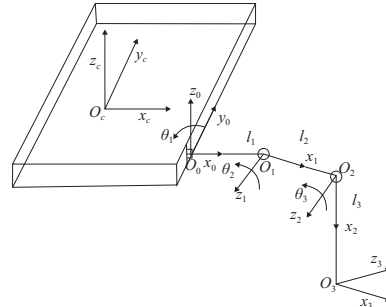


图4 机械腿 IV 的 D-H 坐标系

表 1 关节参数

i	θ_i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i
1	θ_1	l_1	$\pi/2$	0
2	θ_2	l_2	0	0
3	θ_3	l_3	0	0

2.2 运动学正解

机体坐标系与机械腿 IV 的第 1 个关节坐标系矩阵变换为:

$$A_{c,0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

仿生四足机器人机体坐标系到机械腿 IV 与地面接触的坐标系矩阵变换为:

$$A_{c3} = A_{c0} A_{01} A_{12} A_{23} = \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & (l_3 c_{23} + l_2 c_2 + l_1) c_1 + a \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & s_1 (l_3 c_{23} + l_2 c_2) + l_1 s_1 + b \\ s_{23} & c_{23} & 0 & (l_3 s_{23} + l_2 s_2) + c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

所以可得仿生四足机器人足端末端位置坐标为:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (l_3 c_{23} + l_2 c_2 + l_1) c_1 + a \\ s_1 (l_3 c_{23} + l_2 c_2) + l_1 s_1 + b \\ (l_3 s_{23} + l_2 s_2) + c \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $c_{ij} = \cos\theta_i \cos\theta_j - \sin\theta_i \sin\theta_j$; $s_{ij} = \sin\theta_i \cos\theta_j + \cos\theta_i \sin\theta_j$; P_x, P_y, P_z 表示足端末端的坐标。

为了验证上面的正运动学运算是否正确,以机械腿 IV 为例,对各角度进行赋值: $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = -30^\circ, \theta_3 = -60^\circ$ 带入足端坐标 P_x, P_y, P_z 中进行验证可得:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 + l_1 + a \\ b \\ -\left(l_3 + \frac{1}{2} l_2\right) + c \end{pmatrix} \quad (4)$$

与图 4 位置一致,说明求解正确。

2.3 运动学逆解

运动学逆解是根据机器人的末端位姿求出机器人各

关节的角度。本节通过逆运动学求出机械腿 IV 关节角度 θ_1 、 θ_2 与 θ_3 的值。

仿生四足机器人的机械腿 IV 位姿可表示为:

$$\mathbf{A}_{e3} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & \alpha_x & p_x \\ n_y & o_y & \alpha_y & p_y \\ n_z & o_z & \alpha_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

1) 求 θ_1

根据式(2): $\mathbf{A}_{e3} = \mathbf{A}_{e0}\mathbf{A}_{01}\mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23}$

对等式两边同时乘以 $\mathbf{A}_{01}^{-1}\mathbf{A}_{e0}^{-1}$ 可得:

$$\mathbf{A}_{01}^{-1}\mathbf{A}_{e0}^{-1}\mathbf{A}_{e3} = \mathbf{A}_{12}\mathbf{A}_{23} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} f_{11}(a) & f_{12}(a) & f_{13}(a) & s_1(p_y - b) + c_1(p_x - a) - l \\ f_{21}(a) & f_{22}(a) & f_{23}(a) & p_z - c \\ f_{31}(a) & f_{32}(a) & f_{33}(a) & s_1(p_x - a) + c_1(b - p_y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{23} & -s_{23} & 0 & l_2c_2 + l_3c_{23} \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_2s_2 + l_3s_{23} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $f_{11}(a) = n_x c_1 + n_y s_1$; $f_{21}(a) = n_z$; $f_{22}(a) = o_z$;
 $f_{12}(a) = o_x c_1 + o_y s_1$; $f_{31}(a) = n_x s_1 - n_y c_1$; $f_{32}(a) = o_x s_1 - o_y c_1$;
 $f_{23}(a) = \alpha_z$; $f_{33}(a) = n_x s_1 - n_y c_1$; $f_{33}(a) = \alpha_x s_1 - \alpha_y c_1$ 。

取第三行第四列,可解出 θ_1 :

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - b}{p_x - a}\right) \quad (8)$$

2) 求 θ_2 和 θ_3

对式(6)两边同时乘以 \mathbf{A}_{12}^{-1} 可得:

$$\mathbf{A}_{12}^{-1}\mathbf{A}_{01}^{-1}\mathbf{A}_{e0}^{-1}\mathbf{A}_{e3} = \mathbf{A}_{23} \begin{pmatrix} f_{11}(b) & f_{12}(b) & f_{13}(b) & s_2(p_z - c) + c_2T - l_2 \\ f_{21}(b) & f_{22}(b) & f_{23}(b) & c_2(p_z - c) - s_2T \\ f_{31}(b) & f_{32}(b) & f_{33}(b) & c_1(b - p_y) + s_1(p_x - a) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_3c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: $T = p_y s_1 - b s_1 + p_x c_1 - a c_1 - l_1$;

$$\begin{aligned} f_{11}(b) &= n_z s_2 + n_x c_1 c_2 + n_y c_2 s_1; \\ f_{12}(b) &= o_z s_2 + o_x c_1 c_2 + o_y c_2 s_1; \\ f_{13}(b) &= \alpha_z s_2 + \alpha_x c_1 c_2 + \alpha_y c_2 s_1; \\ f_{21}(b) &= n_z c_2 - n_x c_1 s_2 - n_y s_1 s_2; \\ f_{22}(b) &= o_z c_2 - o_x c_1 s_2 - o_y s_1 s_2; \\ f_{23}(b) &= \alpha_z c_2 - \alpha_x c_1 s_2 - \alpha_y s_1 s_2; \\ f_{31}(b) &= n_x s_1 - n_y c_1; f_{32}(b) = o_x s_1 - o_y c_1; \\ f_{33}(b) &= \alpha_x s_1 - \alpha_y c_1. \end{aligned}$$

取第一行第四列与第二行第四列可得等式:

$$s_2(p_z - c) + c_2T - l_2 = l_3c_3 \quad (10)$$

$$c_2(p_z - c) - s_2T = l_3s_3 \quad (11)$$

式(10)与式(11)平方相加可解出 θ_2 为:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{(p_z - c)^2 + T^2 + l_2^2 - l_3^2}{l_2\sqrt{(p_z - c)^2 + T^2}}\right) - \arctan\frac{T}{p_z - c} \quad (12)$$

将 θ_2 带入式(11)中,可解出 θ_3 为:

$$\theta_3 = \arcsin\frac{c_2(p_z - c) - s_2T}{l_3} \quad (13)$$

3 运动学仿真

将仿生四足机器人导入 Adams 环境中,对该机器人在一个周期中进行运动学仿真分析。图 5 为仿生四足机器人行走步态仿真截图,机器人分别迈腿 III—腿 I—腿 IV—腿 II 且机体前移,完成一个周期行走步态,可看出仿生四足机器人行走稳定,设计合理。

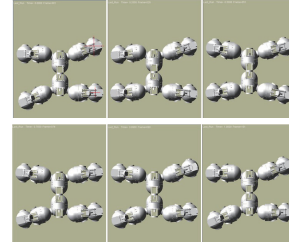


图 5 仿生四足机器人的行走步态仿真截图

图 6 为机械腿 IV 足端在 yOz 平面下的运动轨迹,足端运动轨迹类似于抛物线, y 轴为四足机器人的前进方向, z 轴为垂直地面方向。机械腿的运动曲线连续。图 7 中质心在 x 轴左右方向上的运动位移约为 0, 在 y 轴前进方向上连续运动,表明自重构模块化四足机器人在 y 轴方向做直线运动。

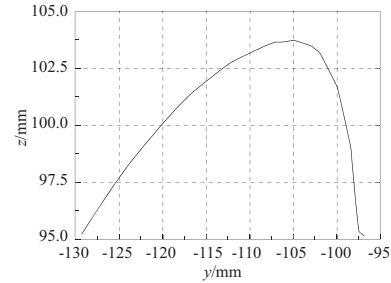


图 6 机械腿 IV 足端的运动轨迹

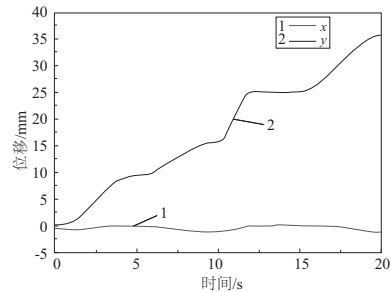


图 7 机体质心前进位移

从图 8、图 9 可以看出自重构仿生四足机器人足端速度和角速度曲线连续,没有发生突变,在行走过程中较平稳,在 10~15 s 时机腿 IV 足端行走一个步伐,在这段时

间足端的速度和角速度有一个上升和下降的幅度。

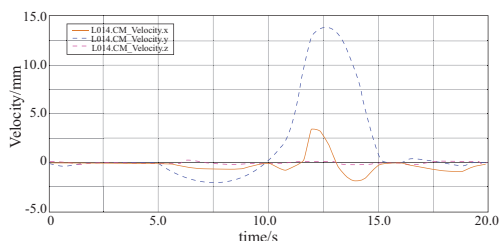


图8 机械腿IV足端速度

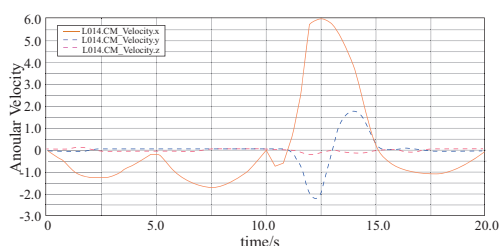


图9 机械腿IV足端角速度

4 结语

本文通过对自重构模块化机器人单元模块进行分析,

提出一种新型自重构仿生四足机器人。对仿生四足机器人进行详细的正运动学和逆运动学分析,并在 Adams 中进行仿真,得到了机器人在行走过程中一些轨迹与速度曲线。通过对曲线的分析,验证了自重构仿生四足机器人平稳行走的合理性与理论推导的正确性。

参考文献:

- [1] YU M J, LIU Y J, WANG C C L. EasySRRobot; an easy-to-build self-reconfigurable robot with optimized design [C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Macau, China; IEEE, 2017: 1094-1099.
- [2] DAVEY J, KWOK N, YIM M. Emulating self-reconfigurable robots - design of the SMORES system [C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal; IEEE, 2012: 4464-4469.
- [3] ZHANG Y, SONG G M, LIU S S, et al. A modular self-reconfigurable robot with enhanced locomotion performances: design, modeling, simulations, and experiments [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3/4): 377-393.
- [4] 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.

收稿日期: 2020-02-21

(上接第 32 页)

失速点总压比相对误差分别为-0.4%和0.5%。除此以外,在这两个非设计转速下,安装角调节误差对该压气机的峰值效率的影响有限。

4 结语

1) 基于时间推进技术的通流彻体力模型对该压气机有较好的模拟能力,其模拟出的堵点流量与实验结果几乎相同。此外,该模型能自动捕获激波以预测压气机的堵塞工况。

2) 90%设计转速下静叶安装角得到优化。用下山单纯形法和遗传算法得出的优化结果近失速点流量分别减小了2.6%和4.0%;稳定裕度分别相对增长了5.6%和8.5%。

3) 90%设计转速下前3排静叶的安装角调节误差都为+1°和-1°时,近失速点流量相对误差分别为-0.8%和2.3%,近失速点压比相对误差分别为-0.5%和0.4%。85%设计转速下前3排静叶的安装角调节误差都为+1°和-1°时,近失速点流量相对误差分别为-1.9%和0.8%,近失速点压比相对误差分别为-0.4%和0.5%。安装角误差对峰值效率的影响有限。

参考文献:

- [1] SINNETTE J T JR. Increasing the range of axial-flow compressors by use of adjustable stator blades [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1947, 14(5): 269-282.
- [2] RUKAVINA J, OKIISHI T, WENNERSTROM A. Stall margin improvement in axial-flow compressors by circumferential variation of stationary blade setting angles [C]//26th Joint Propulsion Conference. Orlando, FL. Reston, Virginia; AIAA, 1990.
- [3] WIEDERMANN A, FRANK D, ORTH U, et al. Computational and experimental analysis of an industrial gas turbine compressor

[C]//Proceedings of ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, Vancouver, British Columbia, Canada; 2012: 319-329.

- [4] SUN J, ELDER R L. Modelling variable stator vane setting in multistage axial flow compressors [D]. Bedfordshire: Cranfield university, 1998.
- [5] WHITE N M, ELDER R L. Optimising stator vane settings in multistage axial flow compressors [D]. Bedfordshire: Cranfield university, 2002.
- [6] 张健, 任铭林. 静叶角度调节对压气机性能影响的试验研究 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 27-30.
- [7] 吴虎, 孙娜. 多级轴流压气机变几何扩稳优化方法研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2558-2563.
- [8] 吴虎, 毛凯, 孙娜. 多级轴流压气机变几何扩稳优化与性能约束分析 [J]. 航空发动机, 2012, 38(6): 11-15.
- [9] 史磊, 刘波, 张鹏, 等. 商用发动机 10 级高压压气机一维特性优化设计 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(7): 1564-1569.
- [10] 廖吉香, 姜斌, 吕从鹏, 等. 多级轴流压气机多排可转导/静叶联合调节规律研究 [J]. 推进技术, 2017, 38(2): 334-340.
- [11] 郭晋, 胡骏, 屠宝锋. 多级轴流压气机彻体力模型——理论方法及简化应用 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1954-1963.
- [12] GALLIMORE S J, CUMPSTY N A. Spanwise mixing in multistage axial flow compressors: Part I—experimental investigation [J]. Journal of Turbomachinery, 1986, 108(1): 2v9.
- [13] GALLIMORE S J. Spanwise mixing in multistage axial flow compressors: Part II—throughflow calculations including mixing [J]. Journal of Turbomachinery, 1986, 108(1): 10-16.
- [14] MARBLE F E. Three-dimensional flow in turbomachines [M]. Princeton: Princeton University Press, 1964: 83-166.

收稿日期: 2019-12-02