

快递包裹码垛机器人设计与腿部功能仿真

任丽娟, 沈兴全, 于大国, 申浩
(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 设计一种快递包裹码垛机器人, 以更好地完成快递包裹的分拣与码垛工作。**方法** 通过 Inventor 软件建立整机三维模型, 运用 D-H 齐次坐标变换矩阵建立其左前腿运动学方程, 基于 ADAMS 虚拟样机技术对该快递包裹码垛机器人腿部结构进行结构优化, 并对该机器人分别实施滚动式水平面行走、吸附式爬壁行走的功能特性进行深入分析。**结果** 得出腿部优化设计变量对转角的敏感度, 最终得到最佳腿部结构, 大腿关节转角活动范围可达到 27.34° , 重心高度稳定在 340 mm 左右, 重心稳定。**结论** 仿真结果表明, 该快递包裹码垛机器人具有机构设计合理、运动稳定可靠、动作灵敏等特点, 为现有快递行业提供了一款节省人力及时间的劳动工具。

关键词: 仿生设计; 码垛机器人; 运动学分析; 优化设计; 功能分析

中图分类号: TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0136-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.024

Design of Express Package Palletizing Robot and Simulation of Leg Function

REN Li-juan, SHEN Xing-quan, YU Da-guo, SHEN Hao
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to design an express package palletizing robot for the purpose of better finishing the sorting and palletizing of express package. The complete machine three-dimensional model was established by Inventor software. The left front leg kinematic equation was established with D-H homogeneous coordinate transformation matrix. The structural optimization of the leg structure of the express package palletizing robot based on ADAMS virtual prototyping technology was carried out. The functional characteristics of rolling-type horizontal walking and adsorption-type wall climbing of the robot were respectively implemented for in-depth analysis. The sensitivity of leg optimal design variable to the angle of rotation was acquired to finally obtain the optimal leg structure. The range of motion of thigh joint angle could reach 27.34° , the height of gravity center was stable at about 340 mm, and the center of gravity was stable. The simulation results show that, the express package palletizing robot is characterized by reasonable mechanism design, stable and reliable movement, sensitive action and so on. It can be a tool that is applied in the current express industry and saves manpower and time.

KEY WORDS: bionic design; palletizing robot; kinematics analysis; optimal design; functional analysis

近些年,随着人们生活水平的提高及购物方式的多样化,快递行业得到了蓬勃发展,面对日益递增的快递包裹,以及流行的双十一狂欢,快递员时常要加班到很晚进行快递包裹的分拣与码垛^[1],效率低且工作量大。

码垛机器人在工业生产中主要执行包装、工件的搬运、码垛等工作,而仿生机器人有其特有的运动机构及机敏的运动模式,是一种高性能的机器人^[2-3]。国外最具代表的四足步行机器人是 2005 年 MIT 在单腿机器人的基础上研制的 Big Dog^[4]机器人。国内四

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 山西省回国留学人员项目基金(2015-077); 中北大学校基金(20171412); 先进制造技术山西省重点实验室项目(XJZZ201602)

作者简介: 任丽娟(1991—),女,中北大学硕士生,主攻工程机械。

通信作者: 沈兴全(1969—),男,中北大学教授,主要研究方向为先进制造技术。

足机器人研制工作也取得了一定的成果, 2016 年, 浙江大学-南江机器人联合研究中心在第 3 次世界互联网大会上推出了四足仿生机器人“赤兔”^[5]。

以现有四足仿生机器人为研究背景, 结合码垛机器人及仿生机器人, 在此基础上设计了一款仿生壁虎的用于快递包裹码垛的机器人, 该机器人有效地结合了移动机器人与操作机器人^[6]的功能特点, 可实现多种空间环境下复杂作业的完成。此外, 为使机器人可快速且灵活地适应不同工作环境, 将足部结构设计为吸附式行走与滚轮式快速移动 2 种截然不同的运动方式, 即可完成水平地面的快速滚动式移动, 也可完成垂直壁面的吸附式移动。通过仿真实验验证了设计的合理性与可行性。背部安装的机械臂可完成快递包裹的码垛等动作, 机械钳手可夹持绳索, 顺利高空快递包裹的取放动作^[7-8]。

1 结构与运动学分析

1.1 结构设计

设计的快递包裹码垛机器人(以下简称码垛机器人)整机三维模型见图 1, 它的整体外形尺寸为: 长 560 mm, 宽 250 mm, 高 1200 mm。

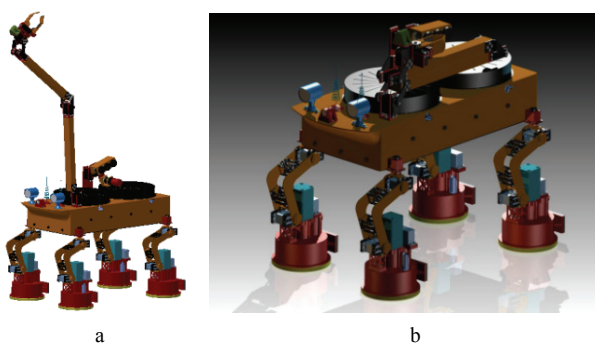


图 1 快递包裹码垛机器人三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of express package palletizing robot

码垛机器人共有 4 条机械腿, 腿部是舵机驱动的多连杆机构, 驱动选用舵机是因为舵机中安装有 FP-GA 器件、模拟电路的电路板, 即可实现驱动功能, 同时可使腿部机构完成由舵机内部接收机发出的运动指令^[9]。码垛机器人每条腿有 2 个舵机, 舵机带动齿轮转动, 从而带动连杆机构运动。足部结构中也设计有舵机, 可驱动脚踝处轮子伸出足部, 实现滚轮式快速移动; 当码垛机器人需要在较高处取放快递包裹时, 可在垂直墙面上运动, 位于身体上方的离心机通过控制电磁阀的闭合使足部内腔形成负压空间, 以实现吸附式行走。

设计的码垛机器人除了能够实现自然界中壁虎的正常行走与攀爬外, 在背部另行设计了多自由度机械臂, 该机械臂能够完成自然界壁虎不能完成的任

务, 例如实现空间 360°自由旋转和取放物品的功能, 在机械臂夹持手结构上设计安装有传感器, 可测试夹取快递包裹的形状、质感等, 在码垛机器人身体外壳前方设计有无线接受天线, 可完成操作人员对其所要夹持的快递包裹的选取, 而位于天线前方两侧的摄像头连接 GPS 定位, 完成快递包裹所在位置的具体判断工作; 另外在码垛机器人背部还设计有一套机械钳手, 机械钳手可以实现爬绳索、钢丝等高空悬挂绳的动作, 这样使得码垛机器人除了能够在地面行走外还可在高空完成一定的码垛作业任务。

1.2 腿部机构运动学分析

腿部结构中, 以左前腿为例, 将其近似看做一个 3 自由度的连杆机构, 每个关节对应都是一个转动副。将基坐标系 (0) 定在身体左前方外侧电机转轴处, X_0OY_0 所在平面与码垛机器人身体平行, 其中 Y_0 轴方向为码垛机器人前进的正方向, Z_0 轴与码垛机器人身体垂直。利用 D-H 齐次坐标变换矩阵^[10]建立如图 2 所示的坐标系, 得出末端足部位姿。令 1 号舵机 (身体外侧与腿部连接处)、2 号舵机 (图 2 中 (2) 处) 和 3 号舵机 (图 2 中 (3) 处) 处转角分别为 α, β, ψ 。基坐标系 (0) 零点与坐标 (2) 零点间的距离为 L 。连杆 2、连杆 3、连杆 4 的长度分别为 L_2, L_3, L_4 。

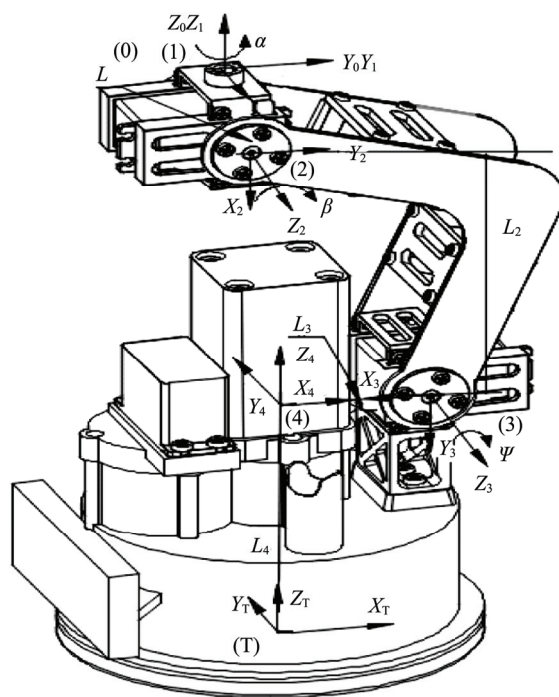


图 2 快递包裹码垛机器人腿部坐标系设定

Fig.2 The setting of the leg coordinates of the express package palletizing robot

末端足部位姿为 $\{n, o, a, p\}$, 其中足部端点在基坐标系中的位置为 ${}^0P=[p_x \ p_y \ p_z]^T$, 末端的执行件足部坐标系 (T) 相对于基坐标系 (0) 的变换矩阵及足部端点在基坐标系中的坐标分别为:

$${}^0_1T = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & L \cos \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & L \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & L_2 \cos \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & L_2 \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos f & 0 & \sin f & L_3 \cos f \\ \sin f & 0 & -\cos f & L_3 \sin f \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_x = (2L_3 + 2L_4) \cos \alpha \cos \beta \cos \psi - (L_4 + 1 + 2L_3) \times \\ \quad (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \sin \psi + \\ \quad L_2 (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + L \cos \alpha \\ p_y = (L_3 + 2L_4) (\sin \alpha \sin \beta \cos \psi + \cos \alpha \cos \beta \sin \psi - \\ \quad \sin \alpha \sin \beta \sin \psi) + 2L_2 \sin \alpha \cos \alpha + L \sin \alpha \\ p_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

以上位姿变换矩阵表示了末端执行件足部的位姿与转角之间的关系。

2 腿部机构优化仿真

2.1 参数优化设计分析

由于该机器人的机身运动姿态由腿部机构的运动决定, 而腿部机构的运动取决于转动副转角的大小, 4条腿运动方式相同, 故取其中1条腿进行研究。分别选择左前腿2号舵机和3号舵机处转动副转角 β , φ 作为目标函数, 将大腿关节处的2个圆心4个坐标参数化, 在不考虑腿部自重和摩擦的情况下, 选择转角最大的一组参数设计^[11]。设置好最大一组参数后即可针对多组数据进行仿真分析。

2.2 优化设计分析

利用 ADAMS 软件可同时对多个变量进行参数化, 通过分析可得到多个变量对目标函数的综合影响, 进而找出关键性变量^[12]。将 POINT_30 (2号舵机关节处), POINT_31 (3号舵机关节处) 的 Y, Z 分别创建为变量 DV_1, DV_2, DV_3, DV_4, 通过分析可得知每个参数对大腿关节转角的灵敏度的影响不一样, 见表1。

从表1可以明显看出, DV_2 和 DV_3 对大腿关

节转角的灵敏度影响最大, 故综合考虑 DV_2 和 DV_3 的变化来分析其对大腿关节转角的影响, 进而找出二者的最优解。通过分析研究报告整理出数据, 见表2。由表2得知, 大腿关节转角活动范围从优化之前的 21°扩大到优化后的 27.34°, 优化效果显著。优化后的尺寸可以明显提高大腿关节的活动范围, 使码垛机器人在同一步态状态下行走距离更大, 进而在一定程度上提高码垛机器人的运动灵活性, 以提高其工作效率^[13]。

表1 各优化设计变量对转角敏感度
Tab.1 Sensitivity of each optimal design variable to the angle of rotation

设计变量	优化点	坐标方向	对大腿关节转角敏感度
DV_1	POINT_30	Y	0.27
DV_2	POINT_30	Z	0.99
DV_3	POINT_31	Y	-1.02
DV_4	POINT_31	Z	0.04

表2 优化结果对比
Tab.2 The comparison of optimized results

参数	DV_2	DV_3	关节转角大小/(°)
优化前	83	91	21
优化后	80	87	27.34

3 功能分析

结合以上所得优化结果, 对码垛机器人进行重新建模, 结合实际应用中的路况对其进行滚动式水平行走、吸附式爬壁行走等功能分析。

3.1 滚动式水平行走功能分析

码垛机器人通过腿部安装的3个舵机提供动力, 足部滚动式运动结构见图3。

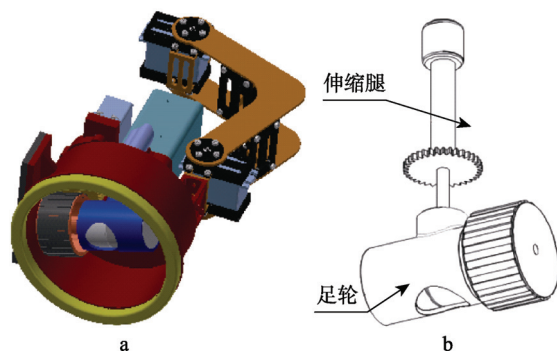


图3 足部结构
Fig.3 Foot structure

码垛机器人在水平面上行走的运动仿真模型见图4。码垛机器人在水平路面上利用伸出的足轮进行滚动式移动时机身重心高度的变化见图5。在该部分的机构设计中, 足部装配的足轮可以进行 360° 旋转, 与足轮相连接的是伸缩腿, 在码垛机器人行走的环境

为平整路面或环境要求机器人快速通过时,码垛机器人足部的伸缩腿伸长使得足轮伸出,以进行滚动式快速移动。在整个仿真运动过程中,重心基本能够保持在一个相对稳定的高度处,由此可知码垛机器人行走运动稳定。

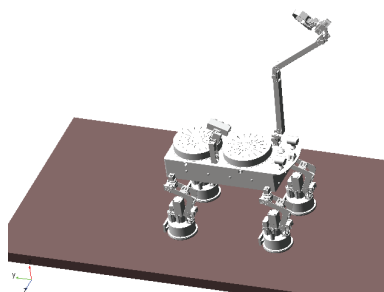


图4 快递包裹码垛机器人水平面行走仿真模型
Fig.4 Horizontal walking simulation model for express package stacking robot

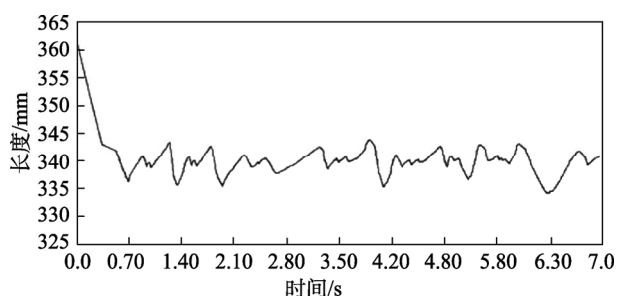


图5 快递包裹码垛机器人身体重心高度变化
Fig.5 Change of body center of gravity of the express package palletizing robot

3.2 吸附式爬壁行走功能分析

快递包裹码垛机器人在已有爬壁机器人的基础上仿照壁虎四足设计足部结构,增加了可实现地面到墙和天花板拐角的行走功能,见图6。码垛机器人的足部除了装配有360°旋转足轮和可伸缩腿(图3)外,足部外侧与地面接触端配有特殊的粘性材料,质柔软、耐磨强和吸附稳定从而能完成吸附、移动等动作,使其具有良好的壁面适应和壁面过度能力^[14]。

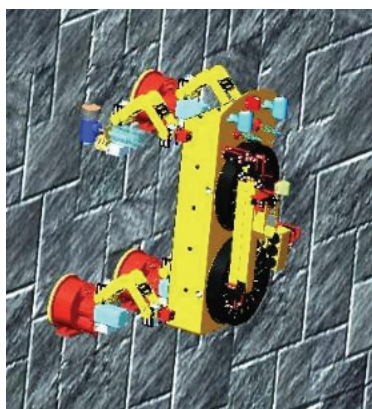


图6 快递包裹码垛机器人爬壁行走模型
Fig.6 Wall climbing model of express package palletizing robot

码垛机器人在垂直墙面的行走方式为真空吸附式行走,在大腿关节处安装有机体驱动电机和机体控制系统,足部安装有执行机构。圆柱状的足部即为真空吸盘,与抽真空管道相连,可进行吸气与放气。在码垛机器人运动过程中,左前右后足与右前左后足交替处于真空负压状态,真空泵与足部之间的抽真空管道保持最低真空状态,由电磁开关的闭合控制吸盘的压力状态。在结构设计中使后足的立足点选择与前足已用过的立足点在一条直线上,从而减少对障碍的判断次数,提高行走速度^[15]。

4 结语

通过仿真分析可知,设计的快递包裹码垛机器人与其他仿生机器人相比,不仅具有移动机器人和操作机器人所具有的基本功能,还具有以下优点:四肢机构的设计结合仿生学及机械设计原理设计,使其更为合理;四肢同时具备吸附行走功能及滚轮式移动功能;虚拟样机仿真研究发现,运动过程中码垛机器人运动平稳可靠;在码垛机器人背部增加携带有4自由度的机械臂,可以实现码垛、夹持、取放物品等功能,并携带有爬绳钳手可实现沿绳索通过高空的功能。总之,设计的快递包裹码垛机器人具有更为强大的功能,能够在一定程度上代替快递人员完成快递包裹的分拣与码垛工作,提高快递员的工作效率。

参考文献:

- [1] 王杰,曹甜. 浅谈快递包裹的现状问题及解决方案[J]. 轻工科技, 2016, 32(2): 129—130.
WANG Jie, CAO Tian. The Present Situation and Solution of Express Parcel[J]. Light Industry Science and Technology, 2016, 32(2): 129—130.
- [2] 朱巧玲,李敏. 智能化背景下机器人和人的发展关系探讨[J]. 改革与战略, 2017(3): 12—16.
ZHU Qiao-ling, LI Min. Discussion on the Relationship Between Robot and Human Development in the Context of Intelligence[J]. Reform and Strategy, 2017, 33(3): 12—16.
- [3] 冯振鹏,林海波,刘鹏程,等. 国内码垛机器人应用研究[J]. 机械工程师, 2017(12): 63—65.
FENG Zhen-peng, LIN Hai-bo, LIU Peng-cheng, et al. Research on the Application of Domestic Palletizing Robot[J]. Mechanical Engineer, 2017(12): 63—65.
- [4] 孟健,刘进长,荣学文,等. 四足机器人发展现状与展望[J]. 科技导报, 2015(21): 59—63.
MENG Jian, LIU Jin-chang, RONG Xue-wen, et al. Development Status and Prospect of Quadruped Robot[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(21): 59—63.
- [5] 朱秋国. 浅谈四足机器人的发展历史、现状与未来

- [J]. 杭州科技, 2017(2): 47—50.
ZHU Qiu-guo. Discussion on the History, Present Situation and Future of the Four Legged Robot[J]. Hangzhou Science and Technology, 2017(2): 47—50.
- [6] 李满天, 蒋振宇, 郭伟, 等. 四足仿生机器人单腿系统[J]. 机器人, 2014, 36(1): 21—28.
LI Man-tian, JIANG Zhen-yu, GUO Wei, et al. Quadruped Robot Single Leg System[J]. Robot, 2014, 36(1): 21—28.
- [7] 李晓刚, 刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 96—102.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Research and Application Status, Problems and Countermeasures of Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [8] 高颖超, 王好臣, 孙莱婧, 等. 瓷板码垛机器人吸盘手爪的设计分析[J]. 机械工程与自动化, 2017(6): 79—80.
GAO Yin-chao, WANG Hao-chen, SUN Mo-jing, et al. Analysis and Design of Palletizing Robot Gripper Suction Plate[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2017(6): 79—80.
- [9] 季雄, 段吉海, 梁海丽, 等. 基于 FPGA 实现协议转换的数字通信[J]. 桂林电子工业学院学报, 2006(3): 170—173.
JI Xiong, DUAN Ji-hai, LIANG Hai-li, et al. Digital Communication of Protocol Conversion Based on FPGA[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2006(3): 170—173.
- [10] PAUL R P. Robot Manipulators[M]. Boston: MIT Press, 1981.
- [11] 祝小梅, 蔡勇, 臧红彬. 多足仿生步行机器人的机构设计与功能分析[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 35—38.
ZHU Xiao-mei, CAI Yong, ZANG Hong-bin. Design and Function Analysis of Multi Legged Bionic Walking Robot Mechanism[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2013(9): 35—38.
- [12] 曹佳琪, 李宝, 袁卫锋. 四足单驱动机械马机构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 228—232.
CAO Jia-qi, LI Bao, YUAN Wei-feng. Design and Analysis of a Four Legged Single Driven Mechanical Horse Mechanism[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2015(4): 228—232.
- [13] 陶俊杰, 臧红彬, 蔡勇. 新型仿生猎豹机器人的机构设计与功能仿真[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 214—216.
TAO Jun-jie, ZANG Hong-bin, CAI Yong. Mechanism Design and Function Simulation of a New Bionic Cheetah Robot[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2015(4): 214—216.
- [14] 王周义, 王金童, 吉爱红, 等. 大壁虎在天花板表面的运动行为与动力学研究[J]. 科学通报, 2010, 55(9): 841—848.
WANG Zhou-yi, WANG Jin-tong, JI Ai-hong, et al. Study on Movement Behavior and Dynamics of Large House Lizard on Ceiling Surface[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(9): 841—848.
- [15] 陈震. 壁面爬行机器人设计及路径规划研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
CHEN Zhen. Design and Path Planning of Wall Climbing Robot[M]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006.