

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201603124

面向数字舞台表演的海龟机器人系统研制

黄 亮^{1,2}, 管贵森^{1,2}, 徐文福^{1,2}, 梁国伟^{1,2}

(1.哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055;2.深圳数字舞台表演机器人技术工程实验室(哈尔滨工业大学 深圳研究生院), 广东 深圳 518055)

摘 要: 针对所创作的机器人戏剧剧本, 研制一套用于数字舞台表演的大型海龟机器人系统. 该机器人由机械系统和控制系统组成, 机械部分由 4 条 3DOF 模块化轻型腿、一套具有连续曲率的柔性脖子、龟壳开合装置和碳纤维框架组成, 所有电机、电路板等机电部件安装于躯干中, 通过同步带将电机的运动传递到外端, 降低了悬臂部分的尺寸和质量, 减轻了电机的负载. 系统的控制部分由上位机及嵌入式控制器组成, 分别提供顶层的人机交互和底层的关节实时控制功能. 采用重心自调整的方法规划运动步态, 确保多足运动的稳定性. 经大量实验, 研制、开发了样机, 完成了机器人戏剧的公演, 所研制的机器人可以完美地演绎戏剧角色, 外形美观, 惹人喜爱, 表演效果极佳.

关键词: 机器人戏剧; 表演机器人; 仿生海龟机器人; 步态规划; 数字舞台

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0020-07

Development of a turtle robot for performance at digital stage

HUANG Liang^{1,2}, GUAN Guisen^{1,2}, XU Wenfu^{1,2}, LIANG Guowei^{1,2}

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
2. Shenzhen Engineering Laboratory of Performance Robots at Digital Stage, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: According to the created robot theatre script, a big turtle robotic system was developed for performance at digital stage. This robot includes mechanics system and control system, and the mechanics system is composed of four 3-DOF modularized light weight legs a flexible neck with continuous curvature, a shell opening and closing device and a carbon fiber torso frame. All the mechanotronics devices, including motors, circuit board et al, are installed in the main body. Through the synchronous belt, the motion of the motor is transferred to the outer end, largely reducing the size and weight of the cantilever, then reducing the load of the motor. The control system consists of a PC and an embedded controller, respectively provides the functions of human-computer interaction at high level and the realtime control of each joint at low level. According to the requirement of performance at the stage, a COG self-adjusting gait planning method was presented, assuring the stability during the movement of multiple legs. Finally, the robotic prototype was developed which had beautiful appearance. After the verification based on certain experiments, the robot was used to conduct a number of public performances. The results showed that the developed robot perfectly played the role of the drama performance and provoked audience to love it.

Keywords: robot theater; performing robot; bionic turtle robot; gait planning; digital stage

机器人戏剧(robot theater)是近年来刚提出的概念,指由机器人或机器人與人共同演绎的舞台表演艺术^[1],它是文化与科技高度融合的典范,其充分利用现有的成熟技术如机器人技术、多传感器融合、全息 3D 投影等,然后加以艺术创造和升华^[2],是一种全新的艺术表现形式. 人和机器人的互动,作为一个跨学科领域,对机器人的形象、动作姿态和情感的表达提出了非常高的要求^[3]. 在戏剧中扮演相应角色的机

器人称为表演机器人(performing robot),具有极强的观赏性和趣味性,其涉及机械、电子、自控、通讯、机器人学和仿生材料等多个领域^[4].

最早用于表演的机器人主要为人形机器人,包括日本的阿西莫机器人^[5]、法国的 NAO 机器人^[6]、韩国的 HUBO 机器人^[7]等,它们常用于进行舞蹈表演. 另外,学者们还研制了进行单项表演的钢琴演奏机器人^[8]、小提琴演奏机器人^[9]、伴舞机器人^[10]、歌唱机器人^[11]等. 2014 年 5 月,世界上第一支机器人重金属乐队“压缩机头”(compressorhead)亮相莫斯科,该乐队有 3 名成员,高约 1.52 m,包括长着 4 条手臂的鼓手“棍子男孩”、长着 79 根指头的吉他手“手指头”以及贝斯手“骨头”,全部由废弃金属打造. 另外,情感机器人也可用于表演^[12-14]. 中国在机

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61573116); 深圳市文化创意产业发展专项资金(深发改[2014]1507 号); 深圳市基础研究计划(JCYJ20140417172417095, JCYJ 20150529141408781)

作者简介: 黄 亮(1993—),男,硕士研究生;
徐文福(1979—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 徐文福, wfxu@hit.edu.cn

机器人表演方面起步较晚,目前主要利用国外的人形机器人进行离线编程,以完成规定的舞蹈动作. 典型代表是参与2016年猴年春晚的优必选阿尔法机器人和参与了2012年龙年春晚的哈尔滨工业大学所编排的“机器人总动员”,引起了极大关注. 然而,若无故事情节的演绎,单纯的机器人舞蹈或弹唱表演,还无法称之为机器人戏剧^[15]. 实际上,机器人戏剧近几年才真正走上舞台. 2008年,日本公演了“机器人是杰斯克的玫瑰花”^[16],由两台机器人和两名真人演员同台表演. 2010年,日本产业技术综合研究所开发了外观和动作接近人类形象和动作的人形机器人HRP-4C^[16],并当众进行了表演. 由机器人参与表演的话剧《再会》也在日本东京艺术节上演,该机器人拥有棕色明眸,梳着棕色中分长发,声音平静,与一群真人演员共同完成表演. 已成功上演的机器人戏剧还包括“我和工作”、“森林深处”等,都给人们留下了深刻的印象^[16]. 用于表演的机器人,运动规划要求极高,虽然舞台的环境不像非结构化环境需要采用复杂的规划方法^[17],但是,安全性、实时性、节奏性要求更高. 也由于表演的特殊性,关注的交点也传统的移动机器人^[18-19]的设计有所不同.

实验室创作了主人公‘豆芽菜’在各种机器人小伙伴的帮助下,不远万里寻找妈妈的机器人话剧故事. 本文针对该剧中龟奶奶的角色,结合仿生技术,研制了一套大型海龟机器人,并建立运动学模型,规划舞台表演的步态,最后进行了样机实验,并在舞台上成功完成了表演. 与以往海龟机器人^[20]或其他四足机器人^[21]不同,本剧中的海龟机器人工作于舞台环境,除了外形、运动形式与海龟相似外,机器人的尺寸、体积要足够大,且脖子运动要求十分灵活,在舞台上可以与观众进行友好互动^[22].

1 面向表演的海龟机器人技术要求

海龟机器人在话剧中扮演主人公豆芽菜的“奶奶”,具有稳定行走、多机器人协调、人-机协调、龟壳开合、避障、远程控制等功能. 除此之外,海龟机器人满足如下技术指标要求:系统质量<10 kg,外形尺寸小于800 mm×600 mm×300 mm,头-颈部长度:300 mm,爬行速度 ≥ 0.3 m/s,负载能力(除自重外)2 kg,连续工作时间>0.5 h,无线操作距离>30 m.

2 海龟机器人系统设计

2.1 系统组成

海龟机器人系统由躯干、腿部、脖子部、龟壳开合、电源及控制器等组成. 为减轻质量并保证结构强度,躯干采用碳纤维材料框架机构,4条腿成对称

性分布,每条腿部具有3个自由度,共12个自由度;龟壳开合装置有1个自由度,由1个电机控制,脖子为柔性结构,由4个有刷电机牵引绳索驱动控制. 其机构简图如图1所示,3D模型如图2所示.

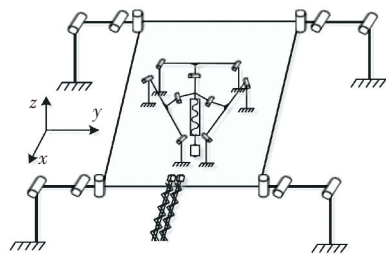
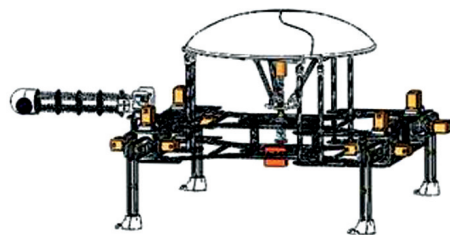
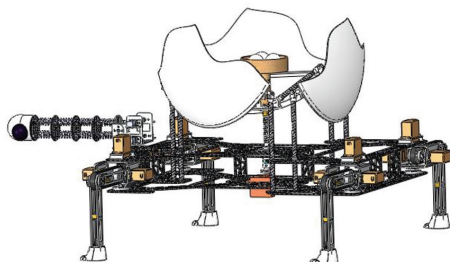


图1 海龟机器人系统机构运动简图

Fig.1 The skeleton of the robotic mechanism



(a) 龟壳合上时



(b) 龟壳打开时

图2 海龟机器人3D模型

Fig.2 The 3D model of the turtle robot

2.2 海龟机器人腿部结构

海龟机器人由4个完全相同的腿部结构组成,每个腿部设计有3个关节,每个关节都包含驱动电机、舵盘、金属框架、传动带等部件. 和传统关节型腿部结构相比,占主要重量的舵机、电路板等机电部件安装于腿的根部与躯干相连的地方,通过传动带将电机的运动转移到外端杆件的连接处,大大降低了腿部悬臂部分的尺寸和质量,减轻了电机的负载,最大程度地提高关节电机驱动能力,使机器人能够更加平稳的行走,具有传动效率高、传动速度快等优点.

2.3 海龟机器人柔性脖子

柔性脖子装置包含动力系统、驱动系统、连接部件和本体结构. 脖子采用绳索驱动方式,动力系统主要为直流有刷电机和齿轮减速装置;驱动系统为电机驱动器;连接部件为轻质金属材料框架,其固定在躯干上,前后分别连接动力系统和本体结构;本体

结构为弹簧连接在开有连接孔的碳纤维固定板上,通过直流电机牵引钢丝绳,进而钢丝绳拉动弹簧,即实现柔性脖子机构按照预定的方式进行运动. 柔性脖子的装配图如图 3 所示,总长 400 mm,包含 250 mm 的本体长度.

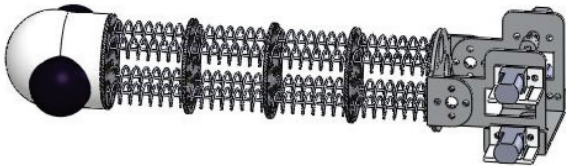


图 3 柔性脖子机构

Fig.3 The mechanism of the flexible neck

2.4 龟壳开合机构

根据舞台表演需要,龟壳可以自由开合,打开后的外形为杜鹃,通过打开的龟壳可以看到海龟身体中的"珍珠",利用固定在机器人身体内部的喷雾器和灯光,打造十分绚丽的视觉效果. 如图 4 所示,龟壳开合机构主要为动力系统和连杆机构. 动力系统由 360°舵机、舵盘和丝杠组成;而连杆机构为 3 个完全相同的曲柄滑块结构,电机正反转实现龟壳的开合.

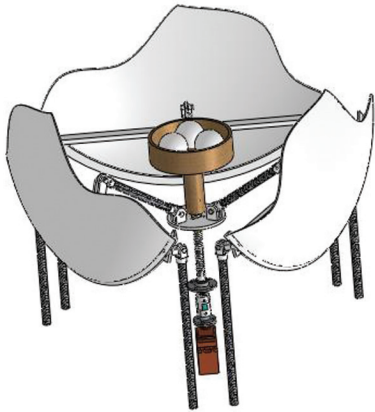


图 4 龟壳开合装置设计

Fig.4 The design of the shell opening and closing device

2.5 海龟机器人控制系统

海龟机器人的控制结构包括 3 层,即决策层,处理层和执行层,如图 5 所示.

在处理芯片的选择方面,综合考虑 FPGA、DSP 和 ARM,在对比成本、开发难易程度和开发周期后选择 ARM 芯片,ARM 芯片内部集成了多组定时器和众多的 I/O 接口,可以大大简化控制的难度和硬件的体积. 在决策层,集成了很多有用的资源,包括 USART,64 kB SRAM、512 kB FLASH,12 位 ADC,16 位定时器,CAN,SPI 等,内核是 ARM CORTEX-M3 CPU. 在处理层,采用 NRF24L01 无线通信方式基于 SPI 接口实现上位机与下位机之间的通信连

接. 上位机为一个简单的控制手柄,可以向主控制器发送指令,定时器控制接口将 PWM 信号发送给执行器,I/O 口电平的高低控制直流有刷电机,控制电机旋转. 在执行层,腿部的电机由定时器 1、2、3、4 分别控制,龟壳开合装置由高级定时器 8 控制,脖子装置通过直流电机驱动器控制.

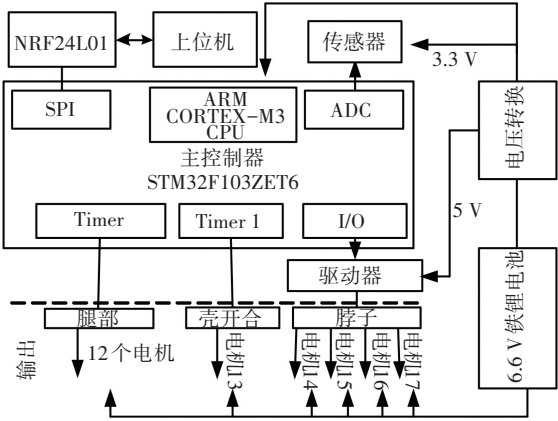


图 5 海龟机器人控制系统

Fig.5 The layout of the control system

2.6 运动控制的实现

基于嵌入式实时操作系统 uc/os-ii 操作系统开发了海龟机器人的运动软件,结构见图 6.

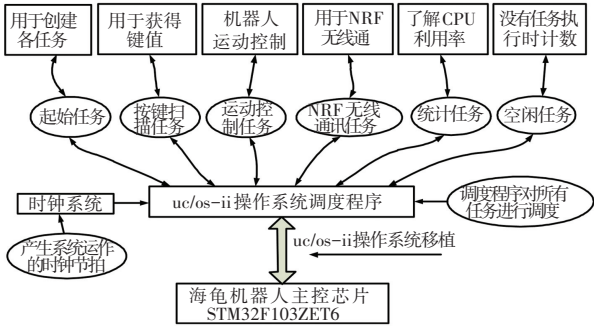


图 6 运动控制软件框图

Fig.6 The flowchart of the motion control software

运用 uc/os-ii 操作系统的多任务管理机制,共需要建立 6 个任务,其中包含两个系统本身必须存在的任务:统计任务和空闲任务,分别用于计算 CPU 的利用率和统计没有任务执行时的计数. 根据机器人运动要求需要新建的任务有开始任务、按键监测任务、运动控制任务和 NRF24L01 无线通讯任务. 开始任务主要负责其余几项任务的创建然后自动挂起;按键监测任务主要负责扫描电路板键盘的按键后获得键值并执行相应的任务;运动控制任务主要负责海龟机器人运动步态的控制. 即舵机和直流电机的控制. 运动控制程序主要是 uc/os-ii 操作系统中运动控制任务的创建、挂起和各个相关任

务下执行函数。

3 机器人步态规划及其动力学仿真

3.1 海龟机器人步态规划方式

稳定性是四足机器人的运动过程中的主要问题,按照步态稳定性类型可以将四足机器人运动方式分为静态稳定性运动和动态稳定性运动。静态运动即重心垂直投影始终在支撑腿形成的多边形区域内部;而动态运动为重心的垂直投影在某些时刻可以不必处于支撑腿形成的区域内,而是处于一种动态平衡的运动过程。控制方法如下:

1) 步态模式选择。选择每条腿的状态如爬行、小跑、快跑等,运动状态决定了机器人静态运动或者动态运动。

2) 步态规划。规划的摆动腿着地点的位置、姿态参数和支撑腿的抬起位置和姿态参数对机器人行走的速度、加速度、平滑性和稳定性有很大的影响。

3) 轨迹规划。规划机器人肢体末端点的行走轨迹曲线,这对行走的速度影响最大。

本机选择爬行步态作为步态模式。理论分析和仿真表明“腿3—腿2—腿4—腿1”的抬跨顺序最为稳定。规划设计时需要首先规划步态周期 T 、单步长度即步幅 L 、抬腿高度 H 。设置运动周期 $T = 8\text{ s}$,步幅为 $L = 140\text{ mm}$,抬腿高度 $H = 40\text{ mm}$ 。足端的加速度曲线应该是平滑的,没有大幅度的突变,最大程度上减小海龟机器人运动过程中摆动腿初始接触地面时受到的冲击力,进而提高机器人运动的稳定性,足端轨迹采用半椭圆和直线组合轨迹,将运动轨迹设计成半椭圆形。

3.2 典型步态规划

四足机器人最典型的静态行走步态是爬行步态,爬行步态可以采用静态稳定判据作为标准的爬行步态。LH、LF、RH、RF 分别表示左后腿、左前腿、右后腿、右前腿,这里只研究占空比 $\beta = 3/4$ 的临界连续爬行状态,机器人摆腿顺序依次为 LH → LF → RH → RF,连续爬行步态是四足移动机器人爬行的一般情况,为了加快整个机器人的步行速度和提高机器人整体运动的协调性,在摆动腿摆动的同时,躯体也相应移动,但这是以牺牲稳定裕度为代价的。机器人其中一肢体抬起后着地的瞬间,另一肢体抬起,按照上面规定的顺序如此循环反复,任何时刻都不存在4条腿同时着地过程。

机器人的运动分为2种状态,摆腿状态和重心调整状态。处于摆腿状态时,摆动腿向前达到下一着地点,处于重心斜侧调整状态时,4肢体全部处于着地状态,通过调整重心来增大稳定裕度,为了保证机器

人取得足够的稳定裕度,需要在运动周期内加入重心调整状态。

连续爬行步态稳定裕度趋近于零,在实际情况下,机器人运动过程不稳定,容易出现向肢体摆动侧倾倒,所以要在一个完整步态周期内增加四足着地支撑阶段,来调整躯干位置使重心投影在稳定区域内。这种状态叫间歇型爬行步态。步态示意图如图7所示。

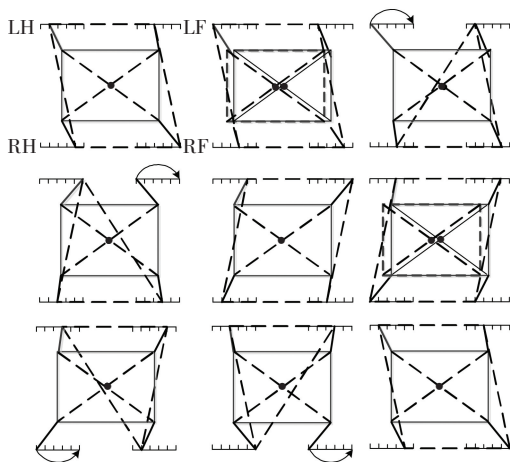


图7 间歇性爬行步态示意

Fig.7 The schematic plot of the intermittent crawl gait

3.3 基于斜侧向重心调整的步态规划

在一般情况下,步态规划假设一条腿的质量比较小,其相对于躯体的质量来说可以忽略不计,这种机器人模型叫做理想模型。在理想模型下,机器人重心与几何中心重合,只需要保证几何中心保持在支撑多边形区域内部就可以规划出保证稳定行走的步态。然而在实际情况下,爬行机器人大多是关节驱动和执行机构直接固连在转动关节上,因此每个肢体相对于躯体来说是不能忽略的,肢体的运动影响到机器人的整体重心位置,进而对海龟机器人的稳定行走产生较大影响,所以在这里只考虑躯干重心的机器人理想模型步态规划方法不成立。因此,这里采用基于斜侧向重心调整的步态优化(也称重心自调整方法,即 COG self-adjusting method)。

实验发现,即使机器人几何中心处在三角形支撑区域内部,在某些时刻重心位置也可能投影到三角形支撑区域外部,机器人会倾倒,因此需要设计一个方法使重心位置在整个运动过程中始终维持在三角形支撑区域内,且稳定裕度要足够大,实现静态稳定行走。斜侧向调整重心能有效地解决这个问题,见图8。基于此方法优化后的步态抬步态见图9。

优化步态的运动过程具体执行过程如下:

1) 四足支撑调整重心前移距离 A ,同时向右侧移动距离 m ,消耗时间 $0.1T$,此时重心向右偏移;

2) LH 腿完成一次抬放动作,重心前移距离 A ,

此过程消耗时间 $0.2T$;

3) LF 腿完成一次抬放动作, 重心前移距离 A , 此过程消耗时间 $0.2T$;

4) 四足支撑调整重心前移距离 A , 向左侧移动距离 m , 消耗时间 $0.1T$, 此时重心向左偏移;

5) RH 腿完成一次抬放动作, 重心前移距离 A , 消耗时间 $0.2T$;

6) RF 腿完成一次抬放动作, 重心前移距离 A , 消耗时间 $0.2T$.

通过斜侧向调整重心的方法, 可以使机器人的重心投影始终在支撑腿着地点形成的多边形区域内部, 进而增大了机器人运动过程中的稳定裕度. 当考虑腿部对重心位置的影响时, 可以避免失稳的情况.

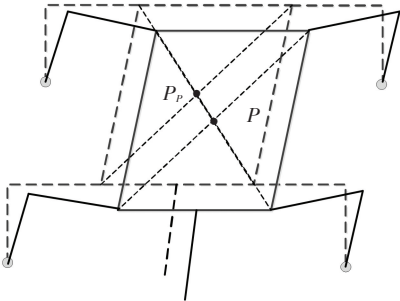


图 8 斜侧向调整重心方法

Fig.8 The COG self-adjusting method

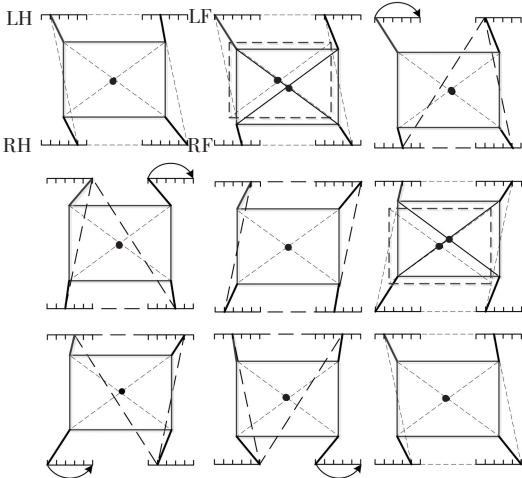


图 9 基于重心斜侧向调整的步态示意

Fig.9 The schematic plot of the gait generated using the COG self-adjusting method

3.4 基于 Webots 的动力学仿真

本文基于 Cyberbotics 公司的 Webots 软件建立了海龟机器人仿真模型, 子节点包含躯干、左前腿、左后腿、右前腿、右后腿、龟壳、脖子、左眼、右眼. 并对所提出的斜侧向重心调整步态规划方法进行仿真, 运动过程见图 10.

在仿真平台里, 海龟机器人模型的各个关节连接处添加力矩传感器, 力矩传感器可以实时采集运

动中各关节的力矩数值. 利用仿真软件中自带的函数 `wb_servo_get_motor_force_feedback()` 采集仿真中的关节力矩数据, 然后保存为数据文档, 后续可在 Matlab 中进行进一步数据分析. 限于篇幅, 在此仅给出运动过程中腿 1 各关节的驱动力矩, 见图 11, 而所有腿部各关节的驱动力矩变化范围列于表 1 中. 可以看出, 最大驱动力矩发生在各腿的膝关节, 大约为 $19\text{ N}\cdot\text{m}$, 该数据作为电机选型的参考.

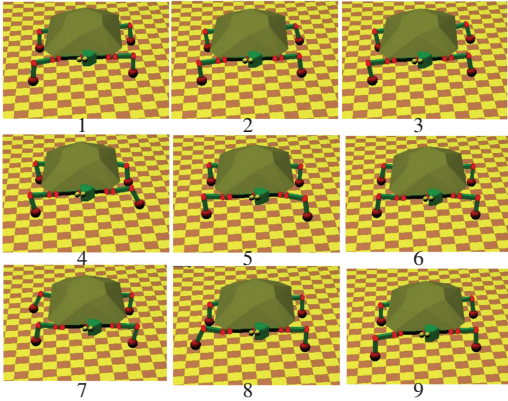


图 10 Webots 步态仿真

Fig.10 The simulation of the gait in Webots

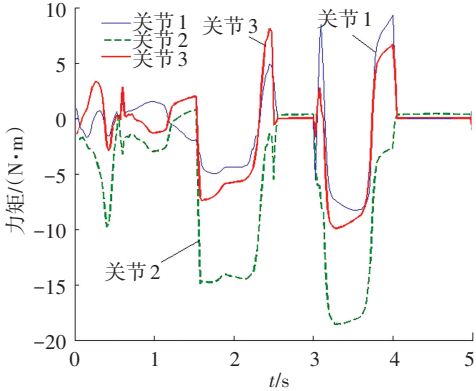


图 11 腿 1 的 3 个关节力矩

Fig.11 The joint torque of the first leg

表 1 运动过程中各关节力矩范围

Tab.1 The range of the joint torque

关节名称		运动幅度/rad	力矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)
腿 1 (RF)	关节 1	$-0.36\sim0.35$	$-8.73\sim9.58$
	关节 2	$-0.12\sim0.28$	$-18.53\sim0.52$
	关节 3	$-1.74\sim-1.19$	$-9.68\sim8.29$
腿 2 (LF)	关节 1	$-0.34\sim0.38$	$-7.94\sim7.39$
	关节 2	$-0.12\sim0.27$	$-18.54\sim1.23$
	关节 3	$-1.81\sim-1.20$	$-8.19\sim6.11$
腿 3 (LH)	关节 1	$-0.39\sim0.33$	$-9.42\sim5.92$
	关节 2	$-0.12\sim0.27$	$-19.32\sim3.56$
	关节 3	$-1.70\sim-1.28$	$-10.10\sim10.52$
腿 4 (RH)	关节 1	$-0.34\sim0.36$	$-4.87\sim6.72$
	关节 2	$-0.11\sim0.27$	$-19.12\sim1.82$
	关节 3	$-1.78\sim-1.28$	$-12.22\sim9.51$

4 样机集成及实验研究

基于上述设计,研制了海龟机器人样机,并开展了运动步态实验,同时,完成了舞台剧《来到深圳的豆芽菜》的公演. 舞台表演用海龟机器人的外观设计效果如图 12 所示.



图 12 海龟机器人外观设计效果图

Fig.12 The appearance design effect of the turtle robot

海龟机器人的步态运动试验包括直线行走、原地转弯、弯道转弯行走等. 试验结果在爬行速度,连续工作时间、无线操作距离等关键技术指标都可以达到预期要求. 图 13 为机器人舞台表演实验. 图 14 为基于斜侧向重心调整的步态稳定性优化实验.



图 13 舞台表演实验

Fig.13 The experiment of the robot performing on the stage

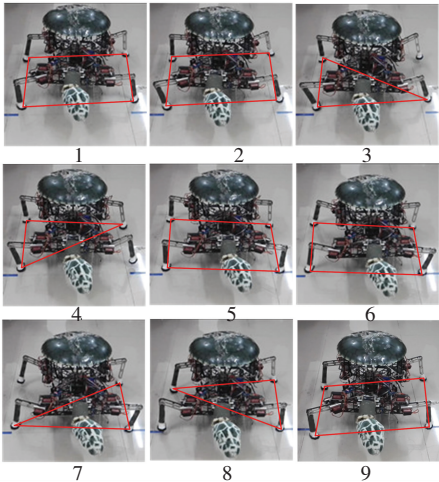


图 14 基于斜侧向重心调整的步态实验

Fig.14 The experiment of the gait based COG self-adjusting
实验表明,最终海龟机器人实际技术指标如下:

- 1)系统质量:6 kg;
- 2)外形尺寸:810 mm ×620 mm ×350 mm;
- 3)头-颈部长度:300 mm;
- 4)爬行速度:0.35 m/s;
- 5)负载能力(除自重外):2 kg;
- 6)连续工作时间:1 h;
- 7)无线操作距离:100 m.

5 结 论

1)针对所创作的机器人戏剧,研制了用于表演的海龟机器人系统,除了从运动功能上考虑了机械结构和机构的设计外,还从艺术表达的角度考虑了外观设计、龟壳及柔性脖子的特效设计和人机交互设计等.

2)采用基于斜侧向重心调整的步态规划方法具有较好的通用性,对于其他四足机器人、六足机器人等的稳定步态规划均具有重要的参考价值.

3)机器人版《来到深圳的豆芽菜》已经公演,表演效果良好,很受观众喜欢.

4)探索并实践了机器人戏剧这一新的艺术表达形式,为满足人们日益增长的精神文明需求提供了一种新的途径. 可以预见,随着文化和科技的发展,机器人戏剧在未来将越来越受到人们的关注,并逐步走进普通人的生活. 这将对戏剧表演的相关理论体系产生影响,同时科技与文化的结合对技术和艺术本身都提出了新的要求,将促进科技和文化的创新和发展.

参考文献

[1] LIN C Y, TSENG C K, TENG W C, et al. The realization of robot theater: humanoid robots and theatric performance[C]//Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics. Munich: IEEE, 2009: 1-6.

[2] KNIGHT H. Eight lessons learned about non-verbal interactions through robot theater[C]//Proceedings of the International Conference on Social Robotics. Amsterdam: DBLP, 2011:42-51. DOI: 10.1007/ 978-3-642-25504-5_5.

[3] MAVRIDIS N, HANSON D. The ibnSina center: an augmented reality theater with intelligent robotic and virtual characters[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Toyama: IEEE, 2009: 681-686. DOI: 10.1109/ ROMAN.2009.5326148.

[4] 樊广灏, 廖启征, 魏世民, 等. 一种舞蹈表演机器人的结构设计及运动分析[J]. 机电产品开发与创新, 2011, 24(6): 7-9. DOI: 10.3969/ j.issn.1002-6673.2011.06.003.

FAN G H, LIAO Q Z, WEI S M, et al. The structural design and kinematic analysis for a dancing robot[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2011, 24(6): 7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2011.06.003.

[5] SAKAGAMI Y, WATANABE R, AOYAMA C, et al. The intelligent

- ASIMO: system overview and integration [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne: IEEE, 2002: 2478–2483. DOI: 10.1109/IRDS.2002.1041641.
- [6] BELLACCINI M, LANARI L, PAOLILLO A, et al. Manual guidance of humanoid robots without force sensors; preliminary experiments with NAO [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE, 2014: 1184–1189. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907003.
- [7] OH J H, HANSON D, KIM W S, et al. Design of android type humanoid robot albert HUBO [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 1428–1433. DOI: 10.1109/IROS.2006.281935.
- [8] LI Y F, LAI C Y. Intelligent algorithm for music playing robot: applied to the anthropomorphic piano robot control [C]//Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronic. Istanbul: IEEE, 2014: 1538–1543. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864843.
- [9] HUANG H H, Li W H, CHEN Y J, et al. Automatic violin player [C]//Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Beijing: IEEE, 2012: 3892–3897. DOI: 10.1109/WCICA.2012.6359122.
- [10] TAKEDA T, HIRATA Y, KOSUGE K. Dance step estimation method based on HMM for dance partner robot [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 699–706. DOI: 10.1109/TIE.2007.891642.
- [11] KAJITA S N T, GOTO M, MATSUSAKE Y. Voca watcher: natural singing motion generator for a humanoid robot [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE, 2011: 2000–2007. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094660.
- [12] 柯显信, 尚宇峰, 卢孔笔. 仿人情感交互表情机器人研究现状及关键技术 [J]. 智能系统学报, 2013, 8(6): 482–488. DOI: 10.3969/j.issn.1673–4785.201212018.
- KE X X, SHANG Y F, LU K B. Analysis of the present research status and key technology of the humanoid emotion-interactive countenance robot [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(6): 482–488. DOI: 10.3969/j.issn.1673–4785.201212018.
- [13] LEE H S, PARK J W, CHUNG M J. A linear affect-expression. space model and control points for mascot-type facial robots [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(5): 863–873. DOI: 10.1109/TRO.2007.907477.
- [14] HIRTH J, SCHMITZ N, BRENS K. Emotional architecture for the humanoid robot head roman [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome: IEEE, 2007: 2150–2155. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363639.
- [15] ANGEL JULIAN M F, ANDREA B. Towards an autonomous theatrical robot [C]//Proceedings of the Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction. Geneva: IEEE Computer Society, 2013: 689–694. DOI: 10.1109/ACHI.2013.120.
- [16] 张炜. 机器人戏剧 [J]. 机器人技术与应用, 2011(5): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1004–6437.2011.05.005.
- ZHANG W. Robot Drama [J]. Robot technique and application, 2011(5): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1004–6437.2011.05.005.
- [17] 周自维, 李长乐, 赵杰, 等. 复杂局部地形中的实时路径规划算法设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8): 65–71. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2014.08.011.
- ZHOU Z W, LI C L, ZHAO J, et al. A real time path planning algorithm based on local complicated environment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8): 65–71. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2014.08.011.
- [18] 王国富, 高峰, 罗杨宇, 等. 转向盘式六足机器人设计及全方位运动控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 129–134. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2012.12.023.
- WANG G F, GAO F, LUO Y Y, et al. Design and omnidirectional motion control of hexapod robot with a steering-wheel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 129–134. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2012.12.023.
- [19] 侯月阳, 吴伟国, 高力扬. 有挠性驱动单元的双足机器人研制与步行实验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1): 26–32. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2015.01.005.
- HOU Y Y, WU W G, GAO L Y. Development and walking Experiments for biped robot with flexible driven units [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(1): 26–32. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2015.01.005.
- [20] 张铭钧, 刘晓白, 徐建安, 等. 海龟柔性前肢仿生推进研究 [J]. 机器人, 2011, 33(2): 229–236. DOI: 10.3725/SPJ.1218.2011.00229.
- ZAHNG M J, LIU X B, XU J A. Bionic research on turtle's flexible forelimb propulsion [J]. Robot, 2011, 33(2): 229–236. DOI: 10.3725/SPJ.1218.2011.00229.
- [21] NA B, CHOI H, KONG K. Design of a direct-driven linear actuator for a high-speed quadruped robot, Cheetaroid-1 [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 924–933. DOI: 10.1109/TMECH.2014.2326696.
- [22] 黄亮. 面向舞台表演的海龟机器人及其多足稳定步态规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- HUANG L. Research on multi-leg stable gait planning of a turtle robot for stage performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

(编辑 杨 波)