

三肢体机器人交叉步态运动规划研究^①

樊继壮^{②*} 李立毅^{*} 朱廷河^{**} 赵杰^{**}

(^{*} 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150080)

(^{**} 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要 对一种新型三肢体腿臂融合机器人的独特交叉步态进行了运动规划。为了提高该机器人行走过程中的姿态稳定性和吸附稳定裕度,采用遗传算法求解其交叉步态行走过程中吸附支撑足的吸附机构受载目标优化问题,对其交叉步态进行优化,得到了相应的步态优化算法和优化参数。仿真和试验结果表明,机器人采用优化后的交叉步态行走时,机器人对吸附支撑机构的作用力矩除运动开始处为固定值外,行走的其余过程中得到了有效的降低,并且机器人运动平稳,具有很好的运动连续性和平稳性。

关键词 肢体机器人, 步态规划, 步态优化, 仿真

0 引言

肢体机器人是在对四足哺乳动物和六腿昆虫进行功能仿生的基础上提出的一种新型仿生机器人^[1]。肢体机器人实现了腿臂机构融合和肢体机构一体设计,在其移动时肢体转变为行走机构,在其执行对目标物体的操作时,肢体可转变为操作机构,克服了腿、臂机构独立设计式移动机器人本体重量大、机构设计复杂的缺点,因而说,肢体机器人的研制对移动机器人的发展与应用具有重要意义^[2,3]。

目前主要采用两种方法实现肢体机器人的腿臂融合功能:一种是基于控制方法的融合,如南洋理工大学的机器人 LAVA、日本 KIMURA 实验室研制的机器人 T-Hexs;另一种是采用机构融合的方法,如日本大阪大学研制的机器人 MELMANTIS-1、ASTERISK 以及日本东京工业大学研制的探雷排雷机器人 TITAN-IX。本项目对一种新型的机构融合式三肢体机器人进行了步态规划研究。该机器人采用三分支机构,可应用于大型储存罐的检测、船体检查等领域。由于机器人采用永磁吸附支撑,并且其关节除转向关节外均采用涡轮蜗杆传动以实现自锁,因此在进行机器人步态运动规划时,将机器人运动

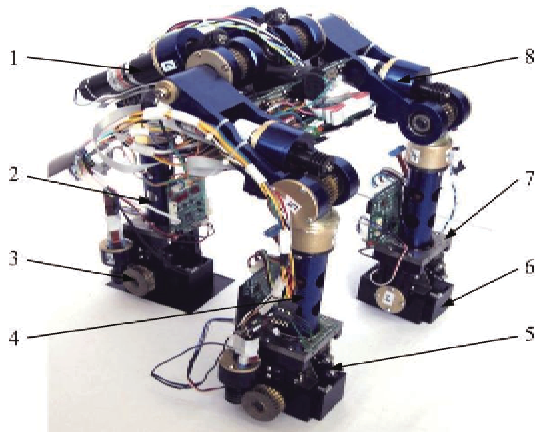
的多样性、连续性、平稳性作为主要设计指标。本研究对这种机器人的交叉步态行走方式进行了运动规划,并提出了一种基于稳定性最优的步态优化算法,以提高机器人行走姿态的稳定性和吸附稳定裕度。理论计算和实验结果验证了此规划算法的有效性。

1 机器人结构及运动形式

图 1 所示为所研制的三肢体机器人。机器人采用三分支结构,共具有 9 个运动关节。其中肢体 2、3 机构形式相同,各具有髋、膝和踝三个关节,肢体 1 无髋关节,具有膝、回转和踝三个关节,各关节均由直流伺服电机驱动,且除肢体 1 回转关节外,其余关节均采用涡轮蜗杆传动以实现关节自锁。机器人的各肢体末端都设计有操作机构和一种基于内平衡原理的永磁吸附机构,两种机构背靠背设计,利用踝关节电机驱动实现操作机构与吸附机构的转换。当吸附机构翻出时,肢体转变为具有吸附功能的行走机构,如果操作机构翻出,则肢体转变为具有操作抓取功能的多自由度操作臂。在机器人的每个足上还装有三维力/力矩传感器、测距传感器和接触传感器,用来感知机器人在操作和行走过程中与操作物体或行走路面的接触信息和周围物体的距离信息^[4]。

① 863 计划(2006AA04Z220),哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2008RFQXG051)和哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT-NSRIF-2009016)资助项目。

② 男,1976 年生,讲师,博士;研究方向:仿生机器人技术;联系人,E-mail: fanjizhuang@hit.edu.cn
(收稿日期:2011-11-10)



1. 伺服电机; 2. 肢体 1; 3. 涡轮蜗杆; 4. 肢体 2; 5. 操作机构
6. 吸附机构; 7. 三维力/力矩传感器; 8. 肢体 3

图 1 三肢体机器人

三肢体机器人具有多种灵活多样的运动形式,如三足蠕动行走、翻转行走、交叉行走以及两足行走等。其中三足交叉行走是该机器人较特殊的一种运动步态,用于在无碍路况下快速行走,主要分为肢体 1 吸附机构吸附,肢体 2、3 姿态一致抬起行走,或肢体 2、3 吸附机构吸附,肢体 1 抬起从肢体 2、3 中间穿过行走两个过程。其中机器人肢体 1 吸附机构吸附,肢体 2、3 姿态一致抬起行走的运动过程如图 2 所示,主要分为以下 4 个步骤完成:

步骤 1:垂直抬起肢体 2、3 足面并距离路面距离设为 h_1 阶段。通过合理设定(a)和(b)两点间运动速度,使肢体 2、3 足部缓速离开路面,以防止足部与路面脱离时发生干涉,如图 2 中(a)到(b)。

步骤 2:肢体 2、3 在肢体 1 两侧摆动至图 2 中(c)所示阶段。

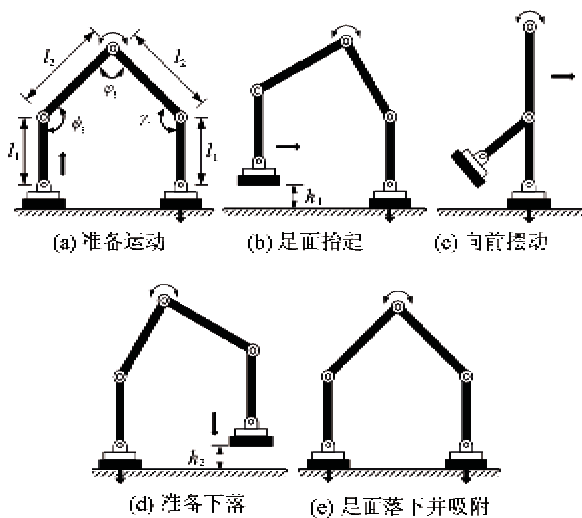


图 2 机器人交叉步态行走序列

步骤 3:肢体 2、3 在肢体 1 两侧由图 2 中(c)摆动至(d)点所示肢体 2、3 足部垂直下落点,并距离路面距离设为 h_2 阶段。

步骤 4:肢体 2、3 吸附足面垂直下落接触吸附路面并吸附阶段。通过合理设定(d)和(e)两点间运动速度,使肢体 2、3 足部缓速接触吸附面,从而避免足部与吸附路面间发生碰撞。如图 2 中(d)到(e)。

肢体 2、3 吸附,肢体 1 运动过程与上述过程基本一致。

2 机器人交叉步态运动规划

机器人步态规划的目的是要得到其各关节运动的轨迹。传统的机器人轨迹规划方法主要有在关节空间的轨迹规划和在笛卡尔空间的轨迹规划两种。由于机器人的交叉运动步态较为复杂,采用关节空间规划方法对其交叉步态进行运动规划。首先将机器人动作一致的肢体 2 和肢体 3 简化为一个肢体^[5],并将机器人交叉步态的运动规划按照图 2 所示分为 4 个步骤完成。

定义肢体 2、3 吸附足面中心在图 2 中 5 个位置点的坐标为 $(p_{xi}^{sn}, p_{yi}^{sn}, p_{zi}^{sn})$, $i = 2, 3, n = 1, 2, 3, 4, 5$, 则机器人初始位置与交叉行走后落足点位置两者关系如图 3 所示。图 3 中 L 为肢体 2、3 落地点距肢体 1 站立点的长度; d 为肢体 2、3 间的距离; l_1 和 l_2 如图 2(a)所示分别为机器人机械结构长度; φ_i 、 φ_i 和 γ_i 为机器人机构运动关节角; θ 为机器人交叉步态落地后机体方向与原来方向间的夹角。

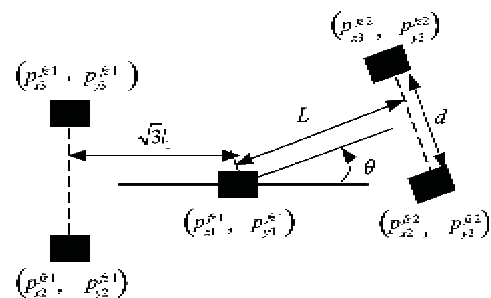


图 3 机器人交叉步态移动足面始末位置关系

肢体 2、3 落地点与起始点位置关系如式

$$\begin{cases} p_{xi}^{es} = p_{xi}^{s1} + L \sin \theta \pm \frac{d \cos \theta}{2} \\ p_{yi}^{es} = p_{yi}^{s1} + \sqrt{3} l_1 + L \cos \theta \mp \frac{d \sin \theta}{2} \end{cases} \quad (1)$$

所示。式中:当为肢体2时,正负号取下部符号,为肢体3时,正负号取上部符号; $\sqrt{3}l_1$ 为肢体2、3翻转前起始点距肢体1站立点沿 y 轴方向的距离,由机器人各关节零位姿态决定;由于机器人的运动方向角 θ 由肢体1的回转关节独立决定,在此设定 $\theta = 0^\circ$ 进行机器人交叉步态运动规划。

通过计算设定机器人在图2(a)至(e)所示5个位置点,肢体2、3吸附足面中心的位置坐标为

$$\begin{bmatrix} p_{x1}^{ja} & p_{y1}^{ja} & p_{z1}^{ja} \\ p_{x1}^{jb} & p_{y1}^{jb} & p_{z1}^{jb} \\ p_{x1}^{jc} & p_{y1}^{jc} & p_{z1}^{jc} \\ p_{x1}^{jd} & p_{y1}^{jd} & p_{z1}^{jd} \\ p_{x1}^{je} & p_{y1}^{je} & p_{z1}^{je} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm d l & -\sqrt{3}l_1 & 0 \\ \pm d l & -\sqrt{3}l_1 & l_n \\ \pm d l & l_2 \sin[2\arctan(\frac{-\sqrt{3}l_1}{l_n})] & l_2 [1 - \cos[2\arctan(\frac{-\sqrt{3}l_1}{l_n})]] \\ \pm d l & L & l_a \\ \pm d l & L & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用机器人逆运动学公式解算出机器人各关节在5个点的对应角度值^[6],然后在关节空间通过规定路径点的三次样条函数来规划机器人的交叉步态运动,并由机器人在规定路径点的速度连续性约束条件:

$$\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}(T) = 0; \quad \dot{\theta}(t_{ik}) = \omega_i \quad (3)$$

式中 θ 分别对应要规划机器人各关节角度。 ω_i 为各关节在对应路径点的角速度。则由以上约束方程,可得到机器人交叉步态中4个阶段各运动关节 ϕ_i 、 φ_i 和 γ_i 的三次样条插值运动函数:

$$\begin{bmatrix} \phi_i \\ \varphi_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t_{ik} \\ t_{ik}^2 \\ t_{ik}^3 \end{bmatrix} \quad (i = 2, 3; k = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中, $i=2,3$ 分别对应肢体2和肢体3, $k=1,2,3,4$ 分别对应4个运动阶段的运动时间; A, B, C 分别为运动关节 ϕ_i 、 φ_i 和 γ_i 的三次样条插值运动函数相对时间 t 的系数矩阵。

利用得到的机器人交叉步态规划算法进行机器人交叉步态运动规划仿真试验。在MATLAB中按照机器人本体尺寸和关节结构关系建立了机器人的

仿真模型,仿真结果如图4所示。

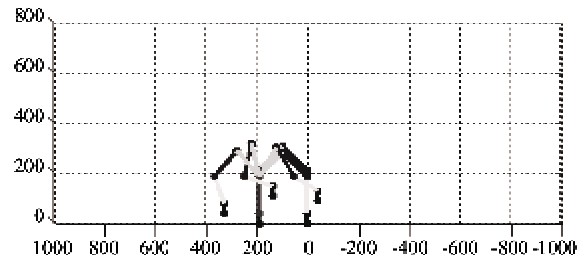


图4 机器人交叉步态仿真

机器人交叉步态仿真中各关节角位移曲线如图5所示。从图中可以得到,各关节角函数是光滑的三次曲线,拐点处过渡平滑,说明机器人在运动的过程中比较平稳,动态性能较好。

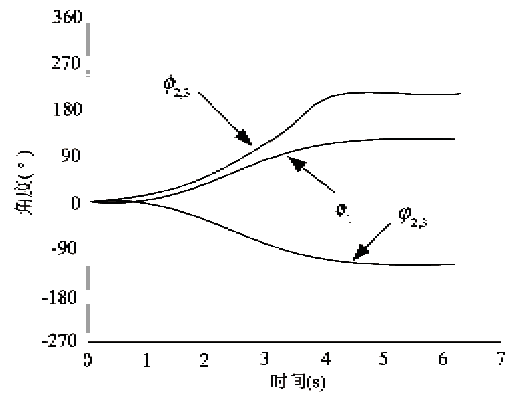


图5 机器人交叉步态关节角位移

3 机器人交叉步态运动优化

三肢体机器人的稳定行走是一个复杂的控制问题,按常规方法对机器人进行的步态规划,可控制机器人按照规划的步态行走,但如果对机器人行走过程中的姿态稳定性指标有特殊要求,其结果就并非是最优解。由于机器人采用磁吸附保持其在移动过程中的平衡,通过优化机器人行走姿态,降低对吸附机构的吸附力要求,提高吸附稳定裕度,对提高机器人行走的稳定性具有重要意义^[7]。

本研究采用遗传算法,以求解机器人交叉步态行走过程中吸附支撑足的吸附机构受载目标优化问题,对机器人的交叉步态关节运动轨迹进行优化。

3.1 优化约束条件

由于机器人的各关节角度运动范围、角速度以及角加速度受到本身机械结构以及驱动单元驱动能力的限制,因此引入机器人关节角度位置约束、角速度约束以及角加速度约束作为机器人交叉步态优化

约束条件^[8]。同时引入倾覆转矩约束,以保证在运动过程中,机器人肢体末端吸附机构可提供满足使用要求的最大可靠吸附力。

3.2 适应度函数

由于三肢体机器人支撑足的永磁吸附机构所受载荷是空间力/力矩,图 6 所示为机器人在采用肢体 1 吸附支撑时的受力分布。

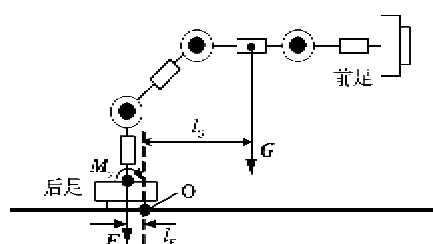


图 6 机器人肢体 1 吸附机构载荷

图 6 中 G 为机器人本体运动部分重力及惯性力的合力, F 为吸附机构可提供的最大吸附力。如果机器人发生倾倒,则在倾倒瞬间,机器人将绕 O 点倾倒。 l_f 和 l_g 分别为力 F 和 G 相对于 O 点的力臂。 M_y 为作用在肢体 1 末端足部上垂直纸面方向的倾覆转矩。

机器人在行走过程中本体运动部分重力及惯性力的合力 G 随着机器人姿态和运动速度的变化对吸附足端作用的载荷可通过下式得到:

$$G \times (l_g + l_f) = M_y \quad (5)$$

采用牛顿-欧拉法建立的三肢体仿机器人的动力学模型如式

$$\begin{cases} \tau_3 = ({}^3R_0n_3)^T ({}^3R_2z_0) + b_3 \dot{\theta}_3 \\ \tau_2 = ({}^2R_0n_2)^T ({}^2R_1z_0) + b_2 \dot{\theta}_2 \\ \tau_1 = ({}^1R_0n_1)^T ({}^1R_0z_0) + b_1 \dot{\theta}_1 \end{cases} \quad (6)$$

所示^[9]。式中 τ_1 、 τ_2 和 τ_3 各为图 2(a) 中关节 γ_i 、 φ_i 和 ϕ_i 的转矩。则根据式(5)和式(6),即可求解机器人在任意姿态下的支撑足吸附机构所受载荷,作为机器人步态载荷目标优化的适应度函数^[10]。

另外由于机器人肢体末端吸附机构可提供的最大可靠吸附力为 320N,经计算吸附机构可提供最大约 12.8 N·m 的吸附力矩,考虑到安全系数,取 10 N·m 为机器人倾覆转矩 M_y 的设计阈值。

3.3 遗传算子

采用二进制码对设计变量进行编码。考虑到关节轨迹曲线之间存在非常紧密的联系,因此采用多参数交叉串行编码策略。各参数编码情况如下:用

长度为 1 位的二进制编码分别表示机器人在移动时 3 个对应运动关节变量 γ_i 、 φ_i 和 ϕ_i , 10 位二进制编码串可以表示从 0 至 1023 之间的 1024 个不同的数,故将 γ_i 、 φ_i 和 ϕ_i 的运动区间离散为 1023 个均等的区域,依次对应 0000000000 (0) 到 1111111111 (1023) 之间的二进制编码,再分别将表示 γ_i 、 φ_i 和 ϕ_i 的 3 个 10 位长的二进制编码串连接在一起,组成一个 30 位长的二进制编码,构成了本文优化问题的染色体编码,其中种群数量设为 100 个,最大优化代数设为 400 代^[11]。

选择算子采用截断选择法,在该方法中个体按照适应度值进行排序,前 10% 直接被填入到下一代。交叉算子采用一点交叉,交叉概率设为 80%。变异算子采用基本变异算子,变异概率取为 10%。

3.4 遗传算法实现

优化运算的步骤如下:

(1) 对关节运动角度变量 γ_i 、 φ_i 和 ϕ_i 进行编码。

(2) 随机初始化群体 $X(0) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

(3) 对当前群体 $X(t)$ 中每个个体 x_i , 根据式(5)和(6)计算其适应度 $F(x_i)$, 适应度表示该个体的性能好坏;

(4) 应用选择、交叉、变异算子产生新一代群体 $X(t+1)$, 这些算子的目的在于扩展有限个体的覆盖面,体现全局搜索的思想。

(5) $t = t + 1$; 如果不满足终止条件继续(3)。

3.5 优化结果

给定移动步长 180mm, 肢体 1 吸附机构吸附, 肢体 2、3 抬起运动。应用优化算法得到机器人肢体 2、3 由抬起运动至落地的过程中, 机器人本体对肢体 1 足部所作用的垂直纸面方向的倾覆转矩 M_y 曲线如图 7 所示, 优化后的倾覆转矩有了明显的下降, 在下降最大处的最大值达到 1.8 N·m。

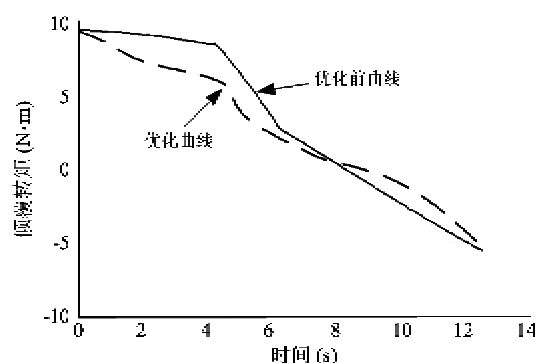


图 7 倾覆转矩 M_y 优化曲线

优化得到的机器人交叉步态各关节的位置、速度曲线如图 8 和图 9 所示。

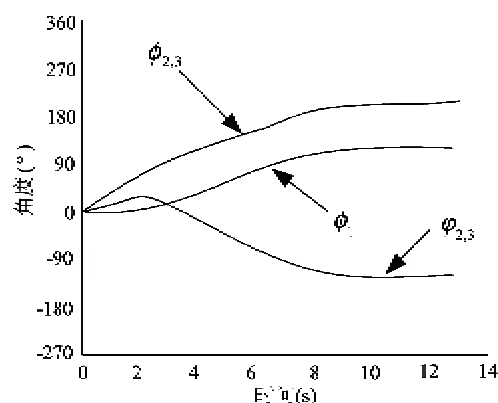


图 8 关节位置曲线

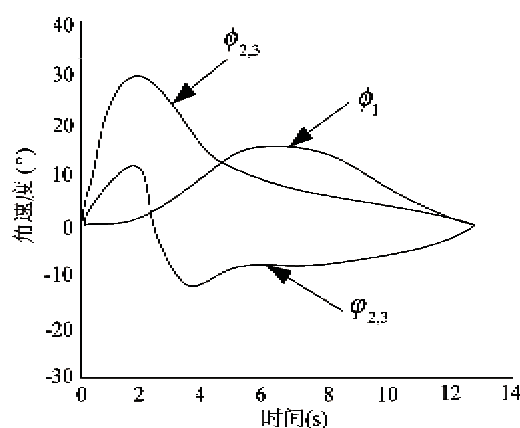


图 9 关节速度曲线

可以看到,机器人在完成交叉步态过程中,肢体 1 的胯关节先缓慢抬起,同时肢体 2、3 的膝关节和胯关节迅速收缩,因此在机器人下面运动时,肢体 1 吸附机构所受载荷以及肢体 1 胯关节电机所需带动的惯量都得到了降低;接下来,肢体 1 胯关节迅速带动机器人本体摆动,同时肢体 2、3 的胯关节继续收缩,而肢体 2、3 的膝关节则反向运动迅速向外展开,整个运动过程只是在接近运动目标吸附点时,速度才有所降低,从而保证了机器人的运动速度。因此机器人在采用上述优化关节轨迹运动时,既可以保证移动速度,又降低了吸附机构所受载荷以及关节驱动力矩,从而在满足运动要求的前提下降低了机器人永磁吸附机构的工作载荷。

4 机器人交叉步态运动试验

利用优化后的机器人交叉步态算法进行机器人

样机试验,试验过程照片如图 10 所示。图 11 为在试验过程中利用机器人肢体 1 足端的三维力/力矩传感器,实时测量得到的肢体 1 吸附机构吸附时,机器人本体运动部分重力及惯性力对其吸附支撑机构作用的倾覆力矩 M_y 。

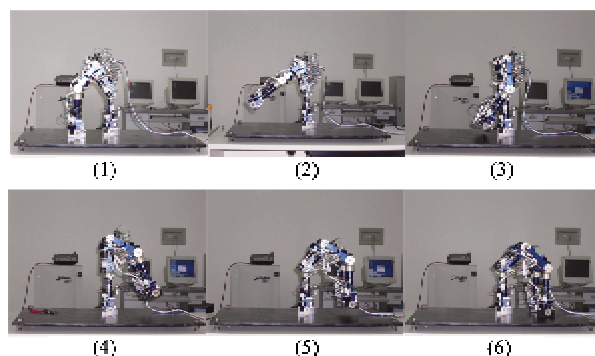


图 10 机器人交叉步态运动试验

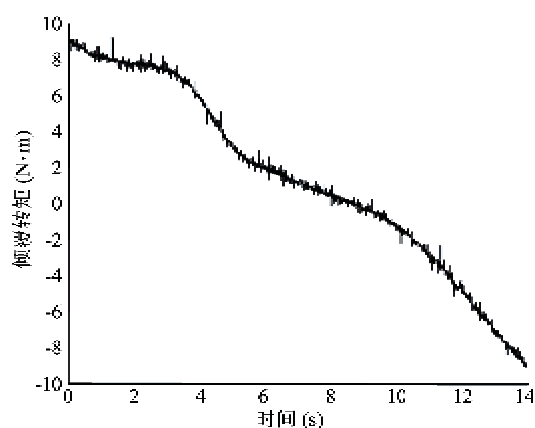


图 11 肢体 1 足端倾覆力矩 M_y

从图 11 中的倾覆力矩曲线可以看出,机器人在行走过程中对吸附支撑机构的作用力矩除运动开始处为固定值外,行走的其余过程中,作用力矩得到了有效的降低,提高了吸附稳定裕度,并且在实验过程中,机器人运动平稳,达到了优化的目的。

5 结论

对三肢体机器人的交叉行走步态进行运动规划,得到了相应的运动规划算法。并对该步态规划算法进行基于运动稳定性最优的步态优化,仿真结果表明:机器人交叉行走过程中运动连续、平稳,具有较大的吸附稳定裕度。

参考文献

- [1] Arai T, Arachi H. Integrated arm and leg mechanism and its kinematics analysis. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995. 994-999
- [2] 樊继壮, 闫继宏, 赵杰等. 肢体机器人的研究. In: Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent System Design and Applications, Dalian, China, 2006. 9232-9236
- [3] 陶卫军, 欧屹, 冯虎田等. 多功能地面移动机器人设计与分析. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 759-764
- [4] Fan J Z, Zhao J, Cai H G. Mechanical design of three-limb robot's foot. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, ICMIT 2005: Control Systems and Robotics, Chongqing, China, 2005. 60422U1-4
- [5] Lum H K, Zribi M, Soh Y C. Planning and control of a biped robot. *International Journal of Engineering Science*, 1999, 37: 1319-1349
- [6] 樊继壮, 朱延河, 赵杰等. 三肢体机器人运动学及运动规划研究. 北京邮电大学学报, 2008, 31(1): 57-61
- [7] Capi G, Kaneko S. Optimal trajectory generation for a prismatic joint biped robot using genetic algorithms. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, (38): 119-128
- [8] 李满天. 微小型尺蠖式壁面移动机器人的研究:[博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2006. 49-56
- [9] 庞明. 三肢体机器人运动规划及控制研究:[博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2008. 38-47
- [10] 王刚, 张立勋, 王立权. 八足仿蟹机器人步态规划方法. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(4): 486-491
- [11] 吴晓. 基于遗传算法的机器人自定位. 华中科技大学学报, 2011, 39(5): 23-28

Research on the crossover gait planning of a three-limb robot

Fan Jizhuang^{* **}, Li Liyi^{*}, Zhu Yanhe^{**}, Zhao Jie^{**}

(^{*} School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

(^{**} State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract

The motion planning for the unique cross gait of a novel three-limb bio-robot with arm-leg integration was conducted. In order to improve its posture stability and the stability margin of absorption in the process of walking, the genetic algorithm was employed to solve the objective optimization problem of the absorption mechanism under load of the standing foot when walking in the cross gait. The cross gait of the robot was optimized and the corresponding gait optimization algorithm and parameters were obtained. The simulation and the experimental results demonstrated that after optimization of the cross gait, the acting moment that acted on the absorption mechanism was efficiently decreased, but staying fixed at the beginning of motion. And the robot possessed the excellent continuity, smoothness and stability.

Key words: limb robot, gait planning, gait optimization, simulation