# 基于粒子群算法的四足机器人静步态优化方法

韩宝玲[1]， 赵锐[1]， 罗庆生[2]， 徐峰[2]， 赵嘉珩[1]
(1. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081;2. 北京理工大学 机电学院,北京 100081)

**摘 要**: 针对四足机器人机身因实现平衡稳定而进行横向调整的静步态稳定性规划问题,提出了一种新的基于粒子群算法的四足机器人机身横向调整参数优化方法. 算法以运动过程中机身的横向调整参数为设计变量,其目标函数综合考虑了四足机器人躯体稳定性、行走直线性等运动性能,并利用 Matlab 与 Adams 软件对所提出的优化方法进行了一系列仿真实验验证. 仿真实验结果表明:所提优化方法可以快速有效地寻求全局最优参数,使四足机器人能够实现具有良好运动性能的静步态.

**关键词**: 四足机器人; 粒子群算法; 横向调整参数; 躯体稳定性; 静步态
**中图分类号**: TP 242 **文献标志码**: A **文章编号**:1001-0645(2017)05-0461-05
**DOI**:10.15918/j.tbit1001-0645.2017.05.005

# Static Gait Optimization Method for Quadruped Robot Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

HAN Bao-ling[1], ZHAO Rui[1], LUO Qing-sheng[2], XU Feng[2], ZHAO Jia-heng[1]
(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract**: Focusing on static gait planning problem when the quadruped robot was adjusting laterally, a new method based on particle swarm optimization (PSO) was proposed to optimize the lateral adjustment parameter. The design variable was the body lateral adjustment parameter in motion. Stability, linearity and other motion performances were considered comprehensively in the objective function. Besides, the simulation experiments were carried out to verify the proposed optimization method in Matlab and Adams. Experimental results show the searching of global optimal parameters can be done quickly and efficiently by the proposed algorithm, such that the robot can achieve a good performance during static gait.

**Key words**: quadruped robot; particle swarm optimization (PSO); lateral adjustment parameter; body stability; static gait

静步态是四足机器人运动的一种基础步态,自然界中的四足动物在低速行进时多采用静步态. 人们通过研究发现,无论是四足动物,还是四足机器人,在面对复杂地形行进时,如翻越障碍、攀登台阶、坡面行进等,采用静步态都是一种比较好的选择. 由此可见静步态的优化设计是具有重要的理论研究意义和重大的工程实用价值的. 当四足机器人以静步态行走时,其 4 条腿分别以一定的相位顺序依次迈动,任意时刻都至少有 3 条腿着地,这就为其保持稳定性创造了条件.

随着四足机器人研究与应用的不断发展,国内外许多学者也对此展开了研究[1-8],林砺宗等[1-3]对于四足机器人静步态规划的研究是以稳定裕度作为评价标准,从支撑三角形理论方面来

**收稿日期**: 2015-12-17
**作者简介**: 韩宝玲(1957—),女,教授,博士生导师.
**通信作者**: 赵锐(1992—),男,硕士生,E-mail:642221729@qq.com.

进行静步态规划，这种方法是较为基础、简单的. 杨超峰等[4-8]在研究中不仅以稳定裕度作为评价标准，而且充分考虑机器人机身重心调整对于运动性能的影响，加入了机身侧向摆动调整，使得机器人运动性能得到了大幅提升. 但是以往的研究依赖于理论分析，人为规划步态. 这种方法既过于复杂，又掺杂了太多理想假设条件，往往与现实情况不符，难以使四足机器人具有真正令人满意的运动性能. 为改善上述不足，文中提出了一种新的基于粒子群算法的四足机器人横向调整参数优化方法. 该方法利用粒子群算法这种启发式智能优化算法，通过多次迭代、评价、寻优、再迭代，最终收敛得到可以使四足机器人实现良好运动性能并且符合仿真模型及环境变量的最优参数值，避免了复杂的理论建模，使之更符合实际环境及条件. 仿真实验中的虚拟模型及运动学模型如图1和图2所示.

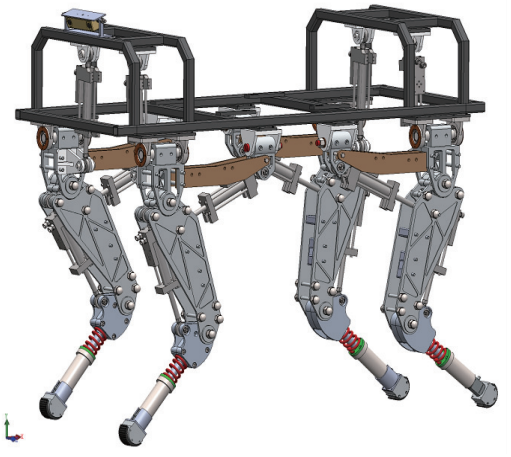


图1 四足机器人虚拟模型图

Fig. 1 Virtual prototype of the quadruped robot

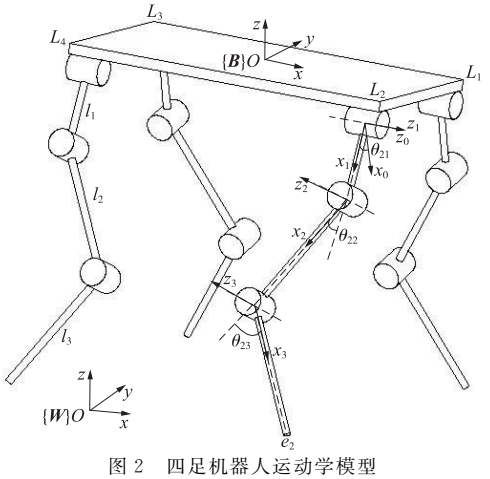



图2 四足机器人运动学模型

Fig. 2 Kinematic model of the quadruped robot

## 1 粒子群算法的实现

### 1.1 设计变量

四足机器人机身的横向调整对于机器人提高躯体稳定性、行走直线性等运动性能具有十分重要的作用. 从仿生学的角度来说，通过观察四足动物如猫、狗的运动过程可以发现它们的身体会随着迈步的过程而进行左右移动调整. 从理论分析上来说，机身的横向调整可以使四足机器人在行进过程中不断的调整重心位置从而拥有持续较高的稳定裕度. 机身横向调整不仅符合仿生学原理而且符合理论分析，可见其对于提升机器人运动性能是十分重要的.

机身轨迹规划：将一个步行周期划分为均等的4份. 机身在0时刻位于 $y=y_1$；机身在 $T/4$ 时刻位于 $y=y_2$；机身在 $T/2$ 时刻位于 $y=y_3$；机身在 $3T/4$ 时刻位于 $y=y_4$. 如图3所示.

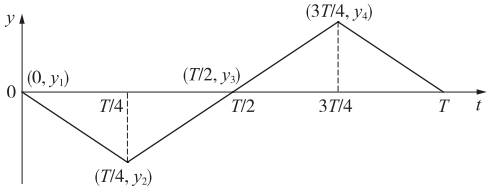



图3 四足机器人机身轨迹规划

Fig. 3 Quadruped robot body trajectory planning

在迭代仿真实验中采用控制变量的方法，文中选取相同的仿真时长、相同的仿真步数、四足机器人的模型相同、摩擦力重力等环境变量相同、四足机器人运动速度、移动步距相同作为常量. 由上述关于步态参数的分析可知优化过程涉及4个设计变量，分别是 $y_1$、$y_2$、$y_3$、$y_4$，对应一个周期内机身横向调整的4个位置点. 根据粒子数=1.5×设计变量数目的经验，因此粒子数取为6. 四足机器人机身横向调整的轨迹依靠这4个位置点进行摆线拟合. 摆线拟合具有速度连续、加速度冲击小的优点.

4个设计变量的取值范围是根据稳定裕度判据，即机器人机身重心位于支撑多边形内进行限定的，如图4中所示 $AB$ 范围之内.

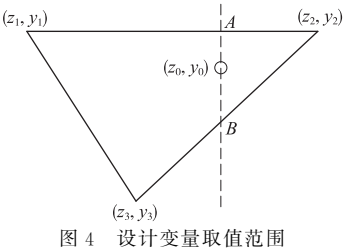



图4 设计变量取值范围

Fig. 4 Design variable range

### 1.2　粒子群初始化

粒子群初始化是一个十分重要的步骤,它关系到整个优化过程中优化收敛的速度与方向. 文中最终采用拉丁方抽样的方法来对粒子和粒子速度进行初始化. 拉丁方抽样具有以较少的重复次数获取较多信息的特点,并且可以使数据更加分散、均布.

运用拉丁方抽样所得数据如下,由数据可以看出数据值在可行域内分布均匀且分散.

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} 0.030\,050 & -0.235\,560 & -0.106\,640 & 0.093\,112 \\ 0.198\,261 & -0.131\,230 & -0.258\,640 & 0.108\,164 \\ 0.008\,108 & -0.079\,530 & -0.066\,520 & 0.193\,070 \\ 0.154\,914 & -0.283\,020 & -0.237\,670 & 0.020\,590 \\ 0.121\,193 & -0.152\,380 & 0.011\,597 & 0.231\,692 \\ 0.232\,957 & -0.017\,440 & -0.176\,370 & 0.159\,662 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} 0.002\,227\,78 & -0.009\,770 & -0.001\,816\,4 & 0.009\,348 \\ -0.000\,507\,00 & 0.008\,670 & 0.001\,045\,9 & -0.005\,730 \\ 0.005\,506\,64 & -0.003\,490 & 0.003\,690\,0 & 0.004\,261 \\ -0.007\,072\,20 & 0.002\,192 & -0.006\,849\,3 & -0.009\,590 \\ -0.006\,280\,50 & -0.002\,450 & -0.004\,345\,5 & 0.001\,392 \\ 0.009\,685\,74 & 0.004\,018 & 0.009\,846\,0 & -0.000\,240 \end{bmatrix}.$$

### 1.3　适应度函数

粒子群算法优化的目标是使四足机器人可以实现最好的运动性能,在躯体平稳性、行走直线性等方面都要综合考量. 通过前期长时间的仿真实验和实物实验的观察和分析,最终确定了 4 个对于运动性能具有重要影响的评价标准. 即最大前进距离 $L_{\max}$;竖直方向上波动量标准差 $\sigma_x$;水平面上横向波动量标准差 $\sigma_y$;前进方向上横滚角波动量标准差 $\sigma_r$.

构建适应度函数应注意以下两点:① 根据目标量对于最终优化目标的影响程度设置权重系数;② 根据各目标量之间数值的数量级关系来设置权重系数. 权重系数设置不合理会使得优化目标的方向产生偏差,难以实现期望的目标.

由于粒子群算法初始化的设计变量较为分散,会导致存在一些劣解,使四足机器人在仿真过程中摔倒. 因此需要分为两种情况:① 仿真过程中四足机器人摔倒;② 四足机器人完成了整个仿真过程. 需要注意机器人摔倒说明此粒子的参数是不能使四足机器人满足运动性能要求的,因此摔倒情况下的适应度值相比于能够完成整个仿真过程的适应度值应大出 1～2 个量级. 综上所述最终确定的适应度函数为

$$f=\begin{cases} 300/L_{\max} & \text{摔倒} \\ 3\sigma_y+10\sigma_x+5\sigma_r+0.5/L_{\max} & \text{未摔倒} \end{cases}. \tag{1}$$

### 1.4　粒子更新

在每一次迭代过程中,粒子通过个体和全局极值更新自身的速度和位置,更新公式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{V}_{id}^{k+1}=\omega\boldsymbol{V}_{id}^{k}+c_1r_1(\boldsymbol{P}_{id}^{k}-\boldsymbol{X}_{id}^{k})+c_2r_2(\boldsymbol{P}_{gd}^{k}-\boldsymbol{X}_{id}^{k}), \\ \boldsymbol{X}_{id}^{k+1}=\boldsymbol{X}_{id}^{k}+\boldsymbol{V}_{id}^{k+1}. \end{cases} \tag{2}$$

## 2　实验过程

实验利用 Matlab 软件对粒子进行初始化及更新,并将生成的四足机器人机身及足端轨迹曲线导入 Adams 软件中进行仿真,对仿真数据进行测量分析及评价,然后不断循环迭代直至仿真结果满足要求. 试验流程如图 5 所示.

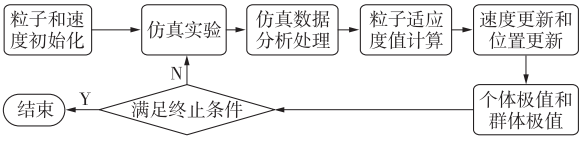



图 5　实验流程图

Fig. 5　Experimental flow chart

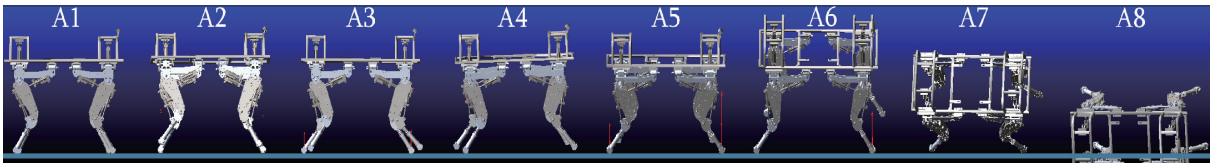
## 3　实验结果及其分析

### 3.1　仿真结果对比

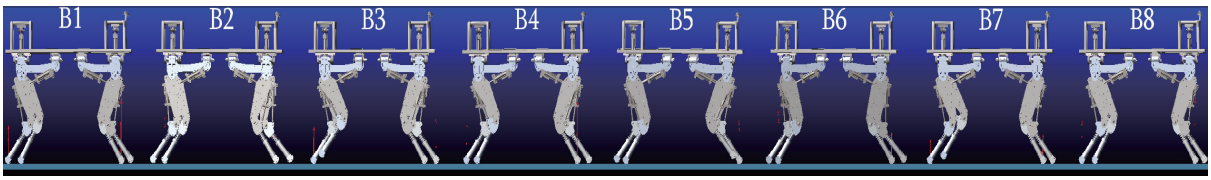
选择粒子群实验前期运动性能较差的粒子与后期运动性能较好的粒子进行对比分析.

A 组所示为基于适应度值较差的粒子参数进行的四足机器人仿真实验过程图. 由图 6 可知四足机器人在运动过程中十分不稳定,随着前进距离的加大机身的抖动和晃动越来越剧烈,并最终摔倒. B 组所示为优化实验后期基于适应度值较优的粒子参数所

设置的四足机器人仿真实验过程图. 由图可知在四足机器人运行过程中,无论是四足着地的稳定调整阶段还是四足依次迈步的三足着地阶段四足机器人都可以保持良好的运动稳定性和直线性,具有良好的运动性能,可见粒子群算法对于四足机器人运动性能的提升起到了巨大作用,实验效果满足预期值.




(a) A组




(b) B组

图 6 不同粒子仿真实验对比图

Fig. 6 Comparison of different particle simulation

### 3.2 粒子搜索过程及适应度值

粒子群算法全局寻优能力强、收敛速度快、鲁棒性好的特点. 多次的迭代就使得设计变量快速收敛到了较小的寻优区域,并且在接下来的搜寻过程中可以继续比较稳定的收敛.

适应度值代表了优化过程中对于粒子好坏的评价结果,即四足机器人运动性能的优劣. 适应度值越小则粒子越好对应的机器人运动性能也越优秀. 适应度值趋势如图 7 所示.

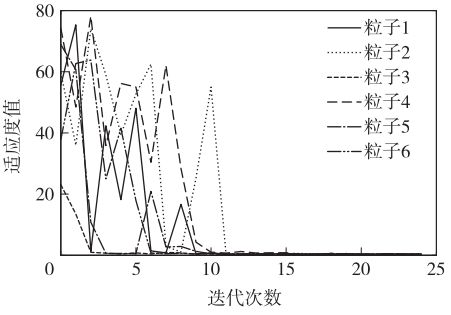



图 7 适应度值趋势图

Fig. 7 Fitness value trend chart

从图 7 中可以看出,适应度值曲线随着迭代次数的增加而快速收敛,从前期[0,80]的波动区间优化到后期[0,0.4]的波动区间,可见寻优过程取得了十分良好的效果,从仿真实验中也可以看出四足机器人的运动性能得到了显著的提高. 实验过程的前期 6 个粒子的适应度值波动较大,主要是由于某些粒子存在劣解导致机器人摔倒从而产生了很大的适应度值,但在局部最优解和全局最优解的影响下适应度值实现了快速地下降,在实验的中后期 6 个粒子的适应度值就实现了在较小的区间[0,0.4]内波动,从而证明了该方法是有效、稳定、快速的.

## 4 结 论

文中提出了一种新的基于粒子群算法的四足机器人横向调整参数优化方法. 该方法可以根据仿真模型与环境变量设计的实际情况,利用粒子群算法通过多次迭代优化,来寻找到可以实现良好运动性能的参数,避免了人为规划所产生的漏洞及误差,并且由于粒子群算法的快速收敛特点及全局寻优特性,使得该方法更具有工程实用价值和理论研究意义. 未来可以在仿真模型设计、环境变量设计以及适应度函数设计上进一步完善.

**参考文献:**

[1] 林砺宗,张松,王启春,等. 四足步行机器人步态规划与稳定性分析[J]. 机械与电子,2010(1):53-57.
Lin Lizong, Zhang Song, Wang Qichun, et al. Gait planning and stability analysis of quadruped walking robot[J]. Machinery and Electronics, 2010(1):53-57. (in Chinese)

[2] 刘西侠,吴振华,金毅,等. 四足机动平台的静步态规划研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2011,25(4):35-38.
Liu Xixia, Wu Zhenhua, JinYi, et al. Study on static gait planning of the quadruped vehicle[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2011,25(4):35-38. (in Chinese)

[3] 王鹏飞. 四足机器人稳定行走规划及控制技术研究[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
Wang Pengfei. Research on quadruped robot steadily walking planning and controlling technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

[4] 杨超峰.液压四足机器人的步态规划研究[D].北京:北京理工大学,2015.
Yang Chaofeng. Research on gait planning for a hydraulic quadruped robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[5] 潘少鹏,施家栋,王建中,等.基于重心侧向摆动的四足机器人爬行步态优化[J].机械科学与技术,2015,34(6):821-826.
Pan Shaopeng, Shi Jiadong, Wang Jianzhong, et al. Crawl gait optimization for quadruped robot based on gravity center lateral movement[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6):821-826. (in Chinese)

[6] 王立鹏,王军政,赵江波,等.基于零力矩点的四足机器人非平坦地形下步态规划与控制[J].北京理工大学学报,2015,35(6):601-606.
Wang Lipeng, Wang Junzheng, Zhao Jiangbo, et al. Foot trajectory generation and gait control method of a quadruped robot on uneven terrain based on zero moment point theory [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(6): 601-606. (in Chinese)

[7] Hirose S, Fukuda Y, Yoneda K, et al. Quadruped walking robots at tokyo institute of technology [J]. Robotics & Automation Magazine IEEE, 2009, 16(2): 104-114.

[8] Atsushi Konno, Katsuhisa Ogasawara, Yoonkwon Hwang, et al. An adaptive gait for quadruped robots to walk on a slope[C]// Proceedings of IEEE international Conference on Intelligent Robots and Systems. [S. l.]: IEEE, 2003:589-594.

(责任编辑:孙竹凤)

(上接第 454 页)

[3] 牛慧峰,姜万录.免疫支持向量机方法在液压泵故障诊断中的应用[J].中国机械工程,2008,19(14):1736-1739.
Niu Huifeng, Jiang Wanlu. Application of hybrid approach based on immune algorithm andsupport vector machine for fault diagnosis of hydraulic pump[J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(14):1736-1739. (in Chinese)

[4] Cui L, Kang C, Wang H, et al. Application of composite dictionary multi-atom matching in gear fault diagnosis[J]. Sensors, 2010,11(6):5981-6002.

[5] 栗茂林,梁霖,王孙安.基于稀疏表示的故障敏感特征提取方法[J].机械工程学报,2013,49(1):73-80.
Li Maolin, Liang Lin, Wang Sunan. Sensitive feature extraction of machine faults based on sparse representation[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2013,49(1):73-80. (in Chinese)

[6] 张晓阳.基于 K-SVD 和残差比的稀疏表示图像去噪研究[D].重庆:重庆大学,2012.
Zhang Xiaoyang. Image denoising via sparse and redundant representations over K-SVD algorithm and residual ratio iteration termination [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

[7] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: an algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2006,54(11):4311-4322.

[8] 梁巍,阙沛文,陈亮,等.基于残差比阈值的迭代终止条件匹配追踪稀疏分解方法[J].上海交通大学学报,2010,44(2):171-175.
Liang Wei, Que Peiwen, Chen Liang, et al. Residual ratio iteration termination condition for MP method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(2): 171-175. (in Chinese)

[9] Liu H, Liu C, Huang Y. Adaptive feature extraction using sparse coding for machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(2):558-574.

[10] 雷亚国,何正嘉,訾艳阳.基于混合智能新模型的故障诊断[J].机械工程学报,2008,44(7):112-117.
Lei Yaguo, He Zhengjia, Zi Yanyang. Fault diagnosis based on novel hybrid intelligent model[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 44(7): 112-117. (in Chinese)

(责任编辑:孙竹凤)