

# 双足步行机器人步态规划方法研究

张 博,杜志江,孙立宁,董 为

(哈尔滨工业大学机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

Research on Gait Planning of Biped Walking Robot

ZHANG Bo, DU Zhi-jiang, SUN Li-ning, DONG Wei

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:**利用三步规划法对 HIT-ROBOCEAN 机器人行走步态进行离线规划,使其实现稳定步行。首先通过对人类行走步态的研究,结合双足机器人的实际结构,规划机器人行走时的基本姿态及重心轨迹;再建立机器人运动学模型,根据规划的行走姿态及轨迹建立运动学方程,求解方程得到机器人各关节的运动轨迹;最后,针对前向运动与侧向运动之间的耦合,对得到的运动轨迹进行修正,使机器人行走更加流畅,并通过实验验证了这种步态规划方法的可行性。

**关键词:**双足机器人;步态规划;三步规划法

**中图分类号:**TP24

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-2257(2008)04-0052-04

**Abstract:** The gait planning with three-step method for HIT-ROBOCEAN is performed off-line, which guarantees the robot's steady walking. Firstly, according to the actual structure of the robot body, the walking pose and gravity center of the robot are planned, based on the study of the humans' gait. And then the kinematics model is established. The kinematics equations in each discrete point are solved out via the walking pose and the programmed tracks, which constitute the motion joints' curves. Since the coupling of robot's forward and sideward motion, the motion curves are revised for steadier walking. Finally, the planning method is validated by the experiments.

**Key words:** biped robot; gait planning; three-step planning method

## 0 引言

步态是在步行过程中,机器人各个关节在时序和空间上的一种协调关系,通常由各关节的运动轨迹来描述<sup>[1]</sup>。步态规划的目标是产生期望步态,即产生在某个步行周期中能够实现某种步态的各关节运动轨迹,这个目标的实现就依赖于有效而可靠的步态规划方法。步态规划是机器人稳定步行的基础,也是双足步行机器人研究中的一个关键技术。要实现和提高机器人的行走性能,必须研究实用而有效的步态规划方法。

双足机器人自由度较多,运动链结构复杂,行走时各自由度之间的关系协调比较困难。采用传统的两步规划法<sup>[2]</sup>将前向运动与侧向运动分开进行,虽然可以获得稳定步态,但机器人行走动作不流畅。为解决此问题,在根据双足机器人的自身特点进行步态规划时采用三步规划法。三步规划法在两步规划法基础上,通过对关节运动曲线进行修正,获得更加流畅的行走步态。第1步根据双足步行机器人的结构特点,规划机器人行走时的基本姿态及运动轨迹;第2步则根据双足机器人的运动学方程,确定其余各关节的运动;第3步对各关节的运动轨迹进行修正,获得更加流畅的步态。

本文关于步态规划的讨论,在哈尔滨工业大学研制的小型双足机器人 HIT-ROBOCEAN 平台上展开。

## 1 机器人姿态及重心轨迹规划

完整的步态规划包括2方面的内容:姿态规划和 ZMP 轨迹的规划。姿态是指机器人在步行运动过程中,某一时刻各组件相对于参考坐标系的空间位置,可由步行运动过程中某一时刻各关节的广义坐标表示<sup>[3]</sup>。ZMP(零力矩点)是指重力与惯性力

收稿日期:2007-12-03

合力的延长线与支撑面的交点,是目前步态规划中应用最广泛的稳定判据,其计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} X_{\text{zmp}} &= \frac{\sum_{i=1}^n f_i X_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z) X_i - \sum_{i=1}^n m_i (\dot{X}_i + g_x) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z)} \\ Y_{\text{zmp}} &= \frac{\sum_{i=1}^n f_i Y_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i (\dot{Y}_i + g_y) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{Z}_i + g_z)} \end{aligned} \right.$$

当机器人运动速度较慢时,惯性力可以忽略上式,即简化为重心投影公式。针对 ZMP 的轨迹规划便简化为重心的轨迹规划。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g X_i}{\sum_{i=1}^n m_i g}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n m_i g Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i g}$$

通过对人类步行运动数据的研究<sup>[4-7]</sup>,并根据机器人的结构特点,对机器人行走时的基本姿态及运动轨迹进行规划:

- a. 机器人采用平行步态<sup>[8]</sup>,双脚轨迹始终保持平行。
- b. 机器人重心在地面投影为正弦曲线。
- c. 行走过程中,髋关节距离地面高度保持不变<sup>[9]</sup>。
- d. 机器人躯干始终保持与地面垂直<sup>[10]</sup>。
- e. 摆动脚高度方向的运动轨迹为正弦曲线。
- f. 脚掌始终保此与地面平行。

利用正弦曲线规划机器人重心轨迹,避免了机器人重心在 2 个脚掌支撑面内转换所引起的冲击,同时也使关节的转动角度改变得更加平滑。此外,为了减小摆动脚着地时引起的冲击,规定摆动脚在高度方向上的运动轨迹为正弦曲线,这样在脚与地面接触的瞬间,速度为 0。

## 2 建立运动学模型

HIT-ROBOCEAN 身高 530 mm,重 2.05 kg。以微型伺服马达作为驱动元件,共 17 个自由度。如图 1 所示为机器人的自由度配置。其腿部共 10 个

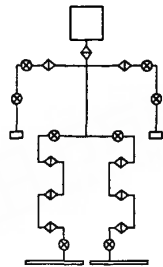


图 1 HIT-ROBOCEAN 自由度配置

自由度,全部是转动关节。首先,建立机器人腿部齐次坐标系,如图 2 所示。在建立运动学方程时,将机器人 2 条腿分别视为 2 个串联机构,在求解机器人运动学方程时,摆动脚相对于支撑脚的运动即可视为机器人中心相对于支撑脚运动和摆动脚相对于机器人中心运动的叠加,从而大大简化了计算量。

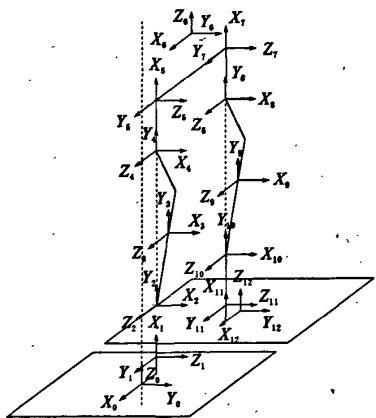


图 2 机器人腿部齐次坐标系

根据规划步态,上身始终保持与地面垂直,可知:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

$$= \begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & p_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & p_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y1} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由此可以得到关节转动角度之间的关系:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0; \theta_1 + \theta_5 = 0$$

对<sup>0</sup>T<sub>6</sub>化简得到:

$$p_{x1} = 88S(\theta_1) - 45.5 - 9S(\theta_1)S(\theta_2 + \theta_3) +$$

$$\begin{aligned}
& 60S(\theta_1)C(\theta_2)+79.5S(\theta_1)C(\theta_2+ \\
& \theta_3)+9S(\theta_1)S(\theta_2) \\
p_{y1} &= -35S(\theta_5)-9C(\theta_2+\theta_3)-79.5S(\theta_2+ \\
& \theta_3)+9C(\theta_2)-60S(\theta_2) \\
p_{x1} &= 50+88C(\theta_1)+79.5C(\theta_1)C(\theta_2+\theta_3)+ \\
& 9C(\theta_1)S(\theta_2)-9C(\theta_1)S(\theta_3+\theta_2)+ \\
& 60C(\theta_1)C(\theta_2)
\end{aligned}$$

式中  $S, C$  ——  $\sin, \cos$ , 文中将一律采用此约定  
同样由机器人行走过程中脚底始终保持与地面平行可知:

$$\begin{aligned}
{}^6T_{12} &= {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 {}^9T_{10} {}^{10}T_{11} {}^{11}T_{12} \\
&= \begin{bmatrix} n_{x2} & o_{x2} & a_{x2} & p_{x2} \\ n_{y2} & o_{y2} & a_{y2} & p_{y2} \\ n_{z2} & o_{z2} & a_{z2} & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{x2} \\ 0 & 1 & 0 & p_{y2} \\ 0 & 0 & 1 & p_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

得到关节转动角度之间的关系:

$$\theta_7 + \theta_8 + \theta_9 = 0; \theta_6 + \theta_{10} = 0$$

对 ${}^6T_{12}$ 化简得到:

$$\begin{aligned}
p_{x2} &= -45.5 + 9S(\theta_6)S(\theta_7) - 9S(\theta_6)S(\theta_8 + \\
& \theta_7) - 88S(\theta_6) - 60S(\theta_6)C(\theta_8 + \theta_7) - \\
& 79.5S(\theta_6)C(\theta_7) \\
p_{y2} &= -27/2C(\theta_{10}) - 9C(\theta_7 + \theta_8) + 60S(\theta_7 + \theta_8) \\
& + 9C(\theta_7) + 159/2S(\theta_7) \\
p_{z2} &= -50 - 79.5C(\theta_6)C(\theta_7) - 60C(\theta_6)C(\theta_8 + \\
& \theta_7) - 88C(\theta_6) - 9C(\theta_6)S(\theta_8 + \theta_7) + \\
& 9C(\theta_6)S(\theta_7)
\end{aligned}$$

### 3 求解关节运动轨迹

将前向和侧向运动分开求解,在机器人行走的过程中,需要通过侧向关节 $\theta_1, \theta_5, \theta_6, \theta_{10}$ 的转动来实现机器人重心在2支撑脚内按正弦规律左右摆动,如图3所示。由规划的姿态可知: $|\theta_1| = |\theta_5| = |\theta_6| = |\theta_{10}| = \theta$ 。

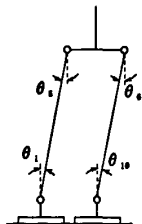


图3 侧向关节运动

根据规划的重心轨迹求解运动学方程,得到一个完整步态下 $\theta$ 随时间 $t$ 的运动曲线,如图4所示。

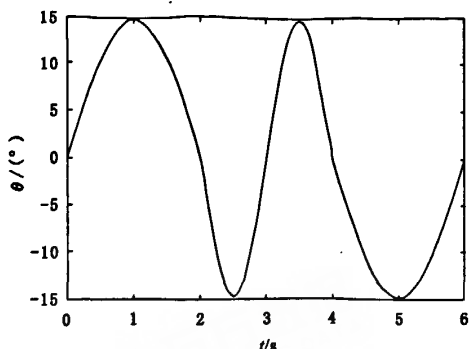


图4 侧向关节运动轨迹

机器人在行走过程中,2条腿交替向前迈出。前向运动由前向关节 $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_7, \theta_8$ 和 $\theta_9$ 的运动来实现,如图5所示。



图5 前向关节运动

在求解机器人前向运动关节曲线时,假设侧向关节不运动,即 $\theta_1 = \theta_{10} = \theta_5 = \theta_6 = 0$ 。求解运动学方程,得到一个步态下前向关节随时间 $t$ 的运动曲线,如图6所示。

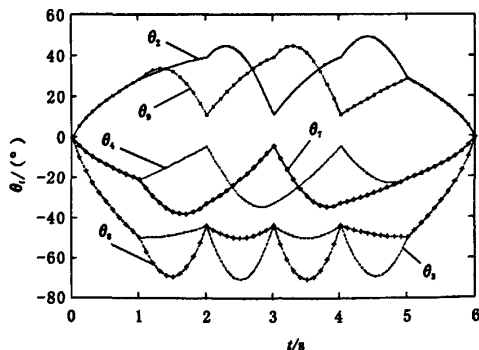


图6 前向关节运动轨迹

### 4 轨迹修正

前向关节与侧向关节同时运动,使机器人重心摆动到2腿中间附近区域内脱稳定区域。对于重心脱离稳定区域的解决方法就是在这些时间段内,使机器人处于双脚支撑期,如图7所示。

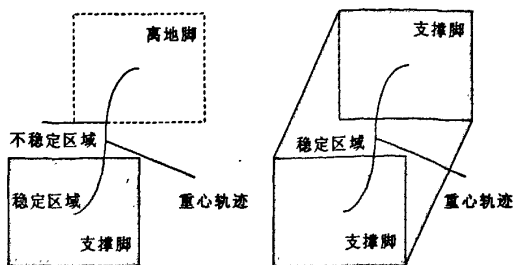


图7 稳定支撑区域

根据重心脱离稳定区域的时间,可以在重心摆动到左、右脚中心时,侧向关节停止运动相应的时间以等待前向关节的运动,前向关节在双脚支撑期同样停止相应的时间以等待侧向关节的运动。通过修正后,各关节运动曲线如图8所示。

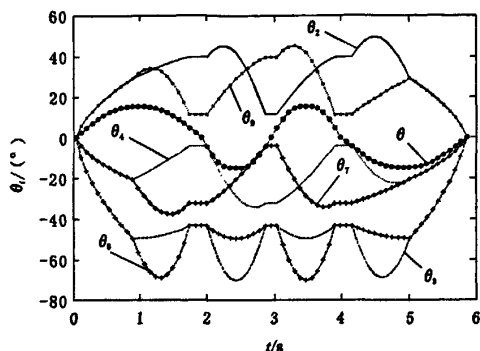


图8 修正后的关节运动轨迹

在摆动脚着地时,往往存在着震动,而且这种震动随着时间累加,最终将导致机器人行走的不稳定。前向、侧向关节在每个步态周期内都有一段停止运动,有利于消除累积误差。

## 5 实验

为了验证步态规划的可行性和有效性,在 Matlab 环境下建立机器人二维杆件模型,根据得出的关节运动曲线,分别对机器人侧向摆动和前向运动进行仿真,如图9所示。从仿真结果可以看出,所求

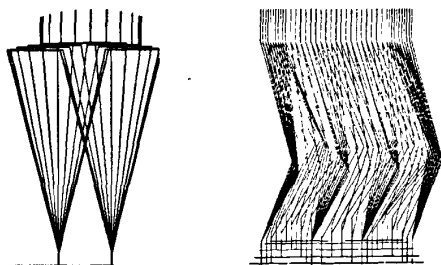


图9 二维运动仿真

得的关节运动曲线实现了规划的步态。

将规划好的步态输入到 HIT-ROBOCEAN 的控制系统,用于驱动微型伺服马达使机器人行走,取得良好效果。

## 6 结束语

针对双足步行机器人的行走步态规划,提出了三步规划法,在传统两步规划法的基础上进行关节运动轨迹修正,使机器人行走步态更加流畅。并将该方法应用到了小型双足机器人 HIT-ROBOCEAN 上,取得良好效果。该方法对于行进速度较慢的机器人行走步态可以实现快速规划关节运动轨迹的效果,但对于行进速度较快的行走步态,则还应进一步考虑惯性力的影响。

### 参考文献:

- [1] 胡洪志,马宏绪.一种双足步行机器人的步态规划方法[J]. 机器人技术与应用,2002,(3):16-18.
- [2] 蒙运红,傅详志.两足步行机器人动态步行规划及仿真[J]. 华中理工大学学报,1999,27(3):28-31.
- [3] 石宗英,徐文立,冯元琨,方海军.仿人型机器人动态步行控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(1):54-56.
- [4] 包志军,马培荪,仝建刚.人行速度规律的实验研究[J]. 实验室研究与探索,2000,(6):39-42.
- [5] 陈东辉,佟金,李重煥,张书军,陈秉聪.人和动物的步态与步行机器人[J]. 吉林大学学报(工学版),2003,33(4):47-49.
- [6] 刘延住,徐俊.人体步行的稳定性[J]. 应用力学学报,1996,13(4):22-27.
- [7] 张瑞红,金德闻,张济川,王人成,马琳.不同路况下正常步态特征研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(8):77-80.
- [8] 陈立新.两足步行机器人步态及运动稳定性分析[J]. 现代机械,1995,(1):21-23.
- [9] 张伟,杜继宏.双足步行机器人的步态规划[J]. 计算机工程与应用,2002,(13):214-216.
- [10] 赛瑞军,马培荪.基于 ZMP 点的两足机器人步态优化[J]. 机械科学与技术,2003,22(1):77-79.

作者简介:张博 (1982-),男,黑龙江鹤岗人,硕士研究生,研究方向为人形机器人;杜志江 (1972-),男,辽宁北宁人,副教授,研究方向为医疗机器人。

# 双足步行机器人步态规划方法研究

作者: [张博](#), [杜志江](#), [孙立宁](#), [董为](#), [ZHANG Bo](#), [DU Zhi-jiang](#), [SUN Li-ning](#), [DONG Wei](#)  
作者单位: [哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江, 哈尔滨, 150001](#)  
刊名: [机械与电子](#) **ISTIC**  
英文刊名: [MACHINERY & ELECTRONICS](#)  
年, 卷(期): 2008, "" (4)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(10条)

1. [胡洪志](#), [马宏绪](#) 一种双足步行机器人的步态规划方法[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2002 (03)
2. [蒙运红](#), [傅详志](#) 两足步行机器人动态步行规划及仿真[期刊论文]-[华中理工大学学报](#) 1999 (03)
3. [石宗英](#), [徐文立](#), [冯元琨](#), [方海军](#) 仿人型机器人动态步行控制方法[期刊论文]-[哈尔滨工业大学学报](#) 2001 (01)
4. [包志军](#), [马培荪](#), [全建刚](#) 人行速度规律的实验研究[期刊论文]-[实验室研究与探索](#) 2000 (06)
5. [陈东辉](#), [佟金](#), [李重焕](#), [张书军](#), [陈秉聪](#) 人和动物的步态与步行机器人[期刊论文]-[吉林大学学报\(工学版\)](#) 2003 (04)
6. [刘延住](#), [徐俊](#) 人体步行的稳定性 1996 (04)
7. [张瑞红](#), [金德闻](#), [张济川](#), [王人成](#), [马琳](#) 不同路况下正常步态特征研究[期刊论文]-[清华大学学报\(自然科学版\)](#) 2000 (08)
8. [陈立新](#) 两足步行机器人步态及运动稳定性分析 1995 (01)
9. [张伟](#), [杜继宏](#) 双足步行机器人的步态规划[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2002 (13)
10. [窦瑞军](#), [马培荪](#) 基于ZMP点的两足机器人步态优化[期刊论文]-[机械科学与技术](#) 2003 (01)

## 相似文献(10条)

### 1. 学位论文 [俞志伟](#) 双足机器人拟人步态规划与稳定性研究 2008

双足机器人具有较高地避障行走能力, 能够实现在各种不同复杂地面上行走, 在仿人双足机器人技术产业发展中具有广阔的应用前景。研究双足机器人拟人步态, 使其实现稳定、快速、拟人行走, 具有重要的理论意义和实用价值。

本文研究了仿生机构的双足机器人稳定拟人行走步态的关键技术, 主要通过研制仿生机构的双足机器人, 深入研究双足行走步态稳定性、拟人步态规划与控制方法等。

本文分析了人的下肢机构自由度分配及关节驱动方式, 设计了具有14自由度仿生机构的双足机器人HEUBR—1。基于人的踝关节运动机理, 设计了一种二自由度空间并联机构, 应用于双足机器人踝关节设计中。针对串联踝关节运动的不平衡性, 优化设计了双足机器人并联踝关节机构, 使双足机器人并联踝关节的运动速度和驱动功率峰值均较为平稳, 通过在ADAMS中仿真实验, 研究优化后并联踝关节的运动性能。

分析了零力矩点(ZMP, ZeroMomentPoint)、压力中心点(COP, CenterOfPressure)的相互关系, 得到了在双足机器人与水平地面无粘性和无吸附力作用下双足机器人的ZMP即为COP的结论。针对拟人步态中支撑面的多种变化, 提出了支撑区域描述方法, 实现对多点接触时支撑多边形的区域描述; 结合ZMP/COP、COG在支撑面内的位置, 提出了基于ZMP/COP、COG的综合稳定性判据, 通过仿真分析表明比传统的ZMP稳定性判据更能准确地评价步态的稳定性。

分析了人的多种行走步态, 提出了双足机器人按不同行走速度下的六种步态形式, 研究了六种步态的膝关节转角、角速度、驱动力矩、足底支撑面变化及稳定裕度, 分析六种步态对应的行走能耗比关系, 比较了各种步态的优缺点及适用范围。针对传统的双足机器人采用无足趾屈膝步态行走, 提出拟人步态规划方法, 在空间三个平面上规划关键步态参数, 采用三次样条拟合方法得到对应参数下的连续轨迹。通过调整腿长和足部角度参数可模拟人的多种行走步态, 调整关键姿态下踝关节角度参数, 能够保证双足机器人稳定行走。

分析了传统精确跟踪COG轨迹和ZMP轨迹等步态控制方法, 结合人在行走时ZMP平稳移动的特性, 提出了一种移动可伸缩倒立摆模型, 在约束平面内分析ZMP与COG的运动关系。提出无需精确跟踪期望的ZMP轨迹, 但应在有效稳定范围内主动调整ZMP实现对COG轨迹跟踪的控制策略。提出了采用移动可伸缩倒立摆模型中伸缩杆驱动力补偿多杆模型中关节驱动力矩, 实现了步态补偿控制。

在双足机器人HEUBR—1样机的实验平台上, 实现不同步幅下多种步态的稳定行走, 比较了三种步态膝关节角度、角速度、驱动力矩、足趾关节转角变化, 以及足底压力值、步态的稳定裕度, 实验表明了二自由度并联踝关节运动性状的改善, 步态的综合稳定性判据的准确性, 验证了拟人步态规划与控制方法的可行性。

### 2. 期刊论文 [赵大伟](#), [廖启征](#), [魏世民](#), [ZHAO Da-wei](#), [LIAO Qi-zheng](#), [WEI Shi-min](#) 一种双足机器人步态规划和运动仿真的研究 -[机械与电子](#)2009, "" (1)

通过对人行行走步态的研究, 结合双足机器人实际结构, 规划机器人行走时的基本姿态及重心轨迹, 建立运动学模型, 根据规划的行走姿态及轨迹建立运动学方程。应用三维建模软件UG建立双足机器人的简化模型, 导入仿真软件ADAMS中生成虚拟样机模型, 并通过在Matlab中得到机器人行走的关节运动轨迹对虚拟样机模型进行控制, 经仿真后, 利用该虚拟样机模型对机器人行走步态进行运动学及动力学分析。应用虚拟样机方法, 验证了步态规划的有效性。

### 3. 学位论文 [郑喜景](#) 基于多目标寻优的双足机器人爬楼梯步态规划 2008

随着仿人机器人硬件水平的不断提高, 仿人机器人的研究领域不断被拓宽和深入, 已经成为了机器人学研究中最受瞩目的课题之一。其中, 双足机器人直立行走的步态规划是仿人机器人技术的基础和重点。针对双足机器人的关节具有较大灵活性的特点, 实现机器人爬楼梯, 走斜坡等复杂动作成为仿人机器人步态规划研究中新的课题。

本文以复杂的楼梯环境为研究背景, 提出了一种基于多目标寻优的双足机器人爬楼梯步态规划的新方法。文中以这种方法为主线, 以双足机器人和楼



梯环境为研究对象进行了如下工作与分析。

首先, 本文以广东省科学中心展项工程“开放实验室机器人”项目的华南理工大学第一代仿人机器人, 型号SCUT-I, 为研究对象, 通过对其机械结构的分析, 建立了仿人机器人简化模型, 其中在视觉方向上建立前向模型, 在其垂直方向上建立侧向模型。在SCUT-I机器人简化模型基础上, 进行正运动学分析和逆运动学求解。同时, 通过动量, 角动量以及零力矩点的定义, 建立了包括速度、加速度等“多阶”运动信息的机器人ZMP稳定平衡方程, 为SCUT-I机器人实现稳定、快速行走提供运动学和动力学的控制基础。

其次, 建立机器人攀爬的楼梯模型, 并对该模型进行数学描述以及确定SCUT-I机器人在楼梯模型中的位姿模式, 包括起始姿态、中间姿态与停止姿态, 从中建立起机器人与楼梯模型之间的空间位置关系; 接着进一步分析机器人在楼梯模型中的状态及机器人各个关节的空间可行域, 建立机器人爬楼梯的约束方程。在这个基础上, 进行机器人爬楼梯的步态周期规划。为了进一步满足周期规划中时间和空间的约束, 文中模拟人类爬楼梯的行为, 进行关键点规划, 借助三次多项式插值的方法规划出机器人爬楼梯过程中摆动腿的髋关节和踝关节的时空关系曲线; 然后通过各个关节的运动轨迹计算出机器人爬楼梯过程中各个时刻的关节角度, 实现关节控制, 最终保证机器人按规划的轨迹顺利攀爬。

再次, 为了进一步保证机器人在爬楼梯过程中的稳定性, 文中提出了基于ZMP的稳定性判定方法, 以及为了保证能量消耗尽量少, 提出了能量消耗判定方法。由此, 文中建立了多目标控制器, 用于协调各个控制目标对机器人步态规划的影响。

最后, 文中提出了SCUT-I机器人爬楼梯控制器的设计框架, 建立了机器人步态参数优化器, 其中重点阐述了多目标优化的表示方法, 分析了优化控制器的数学实质, 并将该优化过程转化为一个带约束条件的极小值问题的求解过程。考虑到遗传算法在多目标优化过程中的易用性和可靠性, 文中利用遗传算法进行极小值问题的求解, 通过多次迭代, 成功找到问题的最优解, 最终规划出机器人在爬楼梯过程中各个关节的运动曲线以及关节角度的时间控制曲线, 使SCUT-I机器人顺利完成了爬楼梯任务。

4. 期刊论文 [贺康云, HE Lian-yun 双足机器人的行走模型及步态规划 -《信息技术与信息化》2008, “”\(2\)](#)

双足步行机器人是一个多变量、强耦合、非线性 and 变结构的复杂动力学系统, 是机器人研究领域中的一个重要分支。根据人类的步行过程及人体的生理结构提出了一种简单的双足机器人模型, 分析了双足机器人在平坦的地面上脚面抬起高度为0的最小能量消耗的行走方式, 并进行了步态规划的研究。

5. 学位论文 [赵大伟 双足机器人的步态规划与仿真研究 2009](#)

机器人汇集了当今世界在机电、材料、计算机、传感器、控制技术等多个学科领域的尖端技术, 机器人技术代表了机电一体化的最高成就, 是二十世纪人类最伟大的成果之一。机器人中的两足步行机器人虽然只有近四十年的历史, 但是由于它独特的适应性和拟人性, 成为了机器人领域的一个重要发展方向。课题旨在设计一种双足人形机器人平台, 在此基础上对双足机器人的步行机理进行研究, 为进一步设计自主的智能双足人形机器人积累经验。

本文首先设计了两足步行机器人的本体结构, 并讨论了关节自由度的设置和驱动系统的配置问题。然后, 基于D-H矩阵对该机器人进行了正逆运动学分析, 该方法运算简便、直观易懂。在运动学建模的基础上, 基于拉格朗日动力学方程进行机器人的动力学建模, 该建模方法可以方便地分析各关节所需的驱动力矩, 作为动力学分析和机器人电机选型的依据。

机器人采用离线规划—再线调整的行走方式, 其中, 对机器人离线规划提出三步规划法。首先, 结合对人类行走步态的研究, 规划机器人行走姿态及轨迹; 在此基础上建立并求解运动学方程, 获得机器人行走时各关节的转角曲线; 最后, 针对前向运动与侧向运动之间的耦合, 对求得的运动曲线进行修正, 使机器人在保证稳定的前提下, 动作更加流畅。

应用虚拟样机技术, 对机器人行走步态进行仿真实验。在Pro/e中建立机器人的简化模型, 导入仿真软件Adams中, 得到的运动曲线控制虚拟样机模型的关节运动。通过仿真实验获得机器人行走时的动态图像及实验数据, 验证步态规划方法的可行性。在进行仿真的过程中, 可以进行动态仿真过程观察、模型更改以及仿真结果的处理工作, 同时获得了小型仿人机器人的行走速度。

6. 期刊论文 [谢涛, 徐建峰, 李霞 神经网络及误差补偿在HIT-III双足机器人步态规划中的应用 -《中国机械工程》2003, 14 \(2\)](#)

运动学求解是双足机器人步态规划的基础。针对HIT-III双足机器人实体, 利用BP神经网络求解其规划运动角和反馈的实际输出角之间的非线性映射。计算结果表明, 该法简便易用, 计算精度高。为了满足机器人在线实时控制要求及进一步提高运算精度, 提出用迭代计算进行误差补偿的方法。

7. 学位论文 [史耀强 双足机器人步行仿真与实验研究 2008](#)

仿人机器人是一个热门的研究领域, 汇集了计算机、电子、通信、自动控制、传感器等多各领域的尖端技术, 代表了机电一体化的最高成就。双足机器人是仿人机器人研究的基础, 关节众多、结构复杂, 有必要在物理样机制造之前, 建立一套虚拟原理样机系统。本文以双足机器人作为研究对象, 主要做了以下几方面的工作。

首先, 回顾和总结了仿人机器人的研究历史和发展现状, 对国内外各主要研究机构设计的仿人机器人进行了分析和对比, 并介绍了本文研究的主要内容。

接着, 根据人体结构比例给出了双足机器人机构设计方案, 主要包括髋关节、膝关节、踝关节和脚部的设计。为了使所设计的机器人能够模拟人的动作, 参考人的各个关节运动范围, 定义了机器人各个关节角的运动范围。

其次, 由于仿人机器人大部分的重量集中在上半身, 因此可以把机器人看作是一个倒立摆, 根据机器人的结构特点, 对机器人采用倒立摆原理进行了离线的步态规划, 并通过ZMP判定准则验证了步态的稳定性。

再次, 利用动力学仿真软件ADAMS建立了双足机器人的虚拟样机, 利用Matlab中的Simulink工具箱建立了机器人的控制系统, 通过ADAMS/Controls接口模块实现了两者的联合仿真, 验证了步态规划、控制算法的有效性, 并得到了机器人在步行过程中各个关节的力矩变化曲线, 为选择电机、减速器等部件提供了依据。

最后, 搭建了双足机器人的实验平台, 并在上面进行了单关节调试、多关节调试、下地步行与其它规划动作调试等实验, 实验中机器人各关节达到了较高的伺服精度, 整体运行协调、平稳, 取得了良好的实验效果, 并对试验结果进行分析并给出了系统存在的不足和改进意见。

8. 学位论文 [周云松 双足步行机器人步态规划与仿真的可视化研究 2006](#)

机器人技术是汇集了当今世界在计算机、机电、材料、传感器、控制技术等多个学科领域的尖端技术, 尤其是双足步行机器人, 因其具有类人的外形和步行方式及其广泛的社会应用前景和多学科的融合特点, 是机器人研究中的一个热门领域。本论文在云南省自然科学基金(2004F0010M)资助课题《多机器人二维协调控制系统理论及应用技术研究》和云南大学重点项目(2003Z009B)资助课题《智能机器人临场交互系统的理论及应用研究》的支持下, 围绕双足步行机器人的行走稳定性, 对步行机器人的步态规划及行走运动过程中机器人特征参数对平衡稳定性的影响等方面进行了研究。

本文以双足步行运动的平衡稳定要求为中心, 以脚尖无冲击、无滑动的步态规划为基础, 采用零力矩点方法分析了双足步行的稳定条件, 通过对双足机器人行走过程中一些特殊点进行采样分析, 对比人类自身行走步态的观察测量值, 采用三次曲线插值方法来计算出双足机器人在行走过程中的行走轨迹。本文的最大特点是居于人体比例设定参数, 计算得出了一条比较光滑平稳的行走轨迹, 使得机器人的行走姿态更像人类的行走。再次是通过Matlab计算仿真。结果表明, 用三次曲线插值方法是一种规划双足机器人行走步态的方便、直观的较好方法, 而且得出的轨迹插值函数比较平滑, 仿真画面变化连续。研究中预示了一批由此可导出的机器人研究方向, 为后继研究奠定了理论上基础。

9. 期刊论文 [柯显信, 龚振邦, 吴家麒 双足机器人上楼梯步态规划的复现性要求 -《应用科学学报》2003, 21 \(1\)](#)

将双足机器人上楼梯的步态规划问题分解为脚踝运动轨迹和臀部运动轨迹的规划问题。通过机器人实现稳定行走的动力学分析和上楼梯的步态规划的几何约束分析, 得到规划步态的可复现性的约束条件。

10. 学位论文 [贾荣丛 基于双足机器人的倒立摆系统的研究 2007](#)

双足机器人是一门与仿生学、多刚体动力学、多传感器融合技术以及控制工程等多学科相结合的交叉学科, 是机器人研究领域中的一个重要分支。双足行走方式具有高度的灵活性, 特别适合于在日常环境中与人类协作完成各种任务, 在康复、日常服务、危险环境作业等领域具有广阔的应用潜力。所以对双足步行机器人行走规划及其控制的研究不仅具有很高的学术价值, 而且具有相当的现实意义。

本文中, 我们根据人类的步行过程及人体的生理结构提出了一种简单的双足机器人模型, 并进行了步态规划的研究, 最终得出了和二级倒立摆模型

相似的双足机器人行走模型。在随后的章节中针对这一模型，用二级倒立摆的平衡控制模拟双足机器人在平坦的地面上，脚面抬起高度为0的最小能量消耗的一种行走方式。

本文围绕二级倒立摆系统，采用LQR-模糊控制方法实现了倒立摆的控制系统仿真和实物系统控制问题。仿真与实物实验均证明本文设计的LQR-模糊控制器有很好的稳定性和鲁棒性。主要研究工作如下：

建立了倒立摆实物系统的数学模型，并对倒立摆系统进行了能控性分析，证明了倒立摆系统是自然不稳定系统，但在平衡点是能控的。针对倒立摆系统，提出了LQR-模糊控制方法，即运用最优控制方法设计最优状态变量合成函数，减少了模糊控制器输入变量的维数，成功解决了“规则爆炸”问题。分析了量化因子对控制效果的影响，通过设置阈值使量化因子在平衡点附近可以自动切换，进而提升了模糊控制器的性能品质。

利用Matlab/Simulink工具进行了二级倒立摆模糊控制系统的仿真研究。该工具使模型的建立更具灵活性，给仿真带来很大方便，从而成功实现了二级倒立摆LQR-模糊控制的仿真。仿真结果证明：LQR-模糊控制器不仅可以稳定倒立摆系统，还具有定位功能。最后将该控制算法运用到倒立摆实物系统中，也取得了令人满意的控制效果。

## 引证文献(1条)

1. 刘凯 基于ADAMS的仿人机器人步态规划算法仿真和实现[期刊论文]-微型电脑应用 2010(3)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jxydz200804017.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxydz200804017.aspx)

授权使用: 广东工业大学图书馆(gdgydxtsg), 授权号: 9fb433d9-38af-4bfa-8d93-9dc2014328c1

下载时间: 2010年7月29日