

# 基于参数优化的类机器人运动规划研究

钟秋波<sup>1</sup>, 朴松昊<sup>2</sup>, 杨 滨<sup>3</sup>

(1. 宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江宁波 315016;  
2. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 3. 中国船舶重工集团公司第703研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘 要:** 在类机器人的运动过程中, 各种不确定因数可能导致其发生摔倒. 当摔倒不可避免的情况下, 本文研究了类机器人倒地动作的最优控制问题, 通过对倒地动作深入分析, 引入一种参数优化技术对倒地动作进行最优控制. 针对参数优化方法对求解问题初值的敏感性和在求解二次规划问题(SQP)中的不足, 使用初值状态筛选器和一种基于改进的二次规划滤子算法对该方法的寻优过程进行了改进, 并和极小值原理控制方法进行了比较. 最后仿真和实验显示了本文所提控制方法的有效性.

**关键词:** 类人机器人; 倒地运动; 最优控制; 参数化优化

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2012)06-1154-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.014

## Research of Motion Control for Humanoid Robot Based on Parametric Optimum

ZHONG Qiu-bo<sup>1</sup>, PIAO Song-hao<sup>2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China;

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

3. Institute of China Shipbuilding Heavy Industry Group No. 703, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** During the process of motion for humanoid robot, it may fall due to some uncertainty factors. Since the falling is inevitable, research on the optimal control of falling for humanoid robot is achieved. By thorough analysis of falling action, optimal control for falling action based on parameter optimum is proposed. For the sensitivity of initial value of problem and lack of SQP (Sequence of Quadratic Programming) in the parameter optimum method, a filter of initial states is designed and a method based on improved SQP filter algorithm is present to improve the optimization process. The optimization results are obtained by comparing with control of the minimum principle and finally the control method is validated in the simulation and experiment.

**Key words:** humanoid robot; falling motion; optimal control; parametric optimum

## 1 引言

类人机器人比起轮式机器人, 具有进行越障、上下楼梯等各种复杂环境中运动的优点<sup>[1,2]</sup>. 但是在进行这样的复杂运动甚至是一些基本的步行运动中, 摔倒在所难免. 尽管现在对类机器人的行走等各种运动有了深入的研究, 并且已经实现了比较稳定的控制, 但是还是不能确保机器人百分之百不摔倒. 这是因为比起四足行走机器人或者轮式机器人, 类机器人的重心较高, 底部支撑面较小的特点使其本身就是一个不稳定结构, 特别是在不确定的环境下进行工作, 或者受到未知外力干扰的情况下的机器人, 摔倒难以幸免<sup>[3~5]</sup>. 摔倒对机器

人造成的影响显而易见, 例如在机器人足球竞赛这样的激烈运动中, 机器人未加任何措施的摔倒有可能直接损坏各种硬件设备. 随着机器人的体积增大, 特别是当机器人与普通人一样身高时, 摔倒对机器人所造成伤害将变得巨大. 在对摔倒研究的过程中我们可以发现造成机器人行走不稳定的主要因数, 从而反过来对机器人的稳定运动研究具有促进作用.

在防止摔倒的研究中, 一般采用两种方式, 第一: 如何进行有效的动作补偿, 使机器人能够消除外界的不稳定状态, 避免摔倒. 第二: 既然不能避免倒地, 那么在如何使机器人造成的伤害达到最小方面进行研究, 其中可以包括一些额外添加的保护措施(例如护膝, 护肘等),

最主要的还是如何控制倒地的动作.本文采用第二种方式,即研究如何最优的进行倒地动作的控制.

参数化控制方法由 Kok-Lay Teo 和 Heung Wing Joseph Lee<sup>[6]</sup>等人于 1977 年提出.该参数化方法的主要思想是用若干段常数去逼近最优解,将最优解控制转换成参数优化问题.再利用经典的参数优化方法即可求出最优控制的一个近似解.参数化控制在月球车的软着陆<sup>[7,8]</sup>和导弹姿态控制上得到了较好的应用,对于解决高维的非线性复杂优化问题具有良好的寻优效果.

本文首先对类人机器人的两种倒地动作进行研究,重点对向前倒地进行动力学的深入分析,然后使用极小值原理、参数化控制、改进的参数优化控制分别对倒地运动进行最优控制,使其在触地时刻的地面冲击、触地位置和倒地之后的稳定性三个方面得到最优.最后对实验结果进行了比较分析.

## 2 参数化控制

### 2.1 参数化最优控制器设计

考虑一般化的非线性系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t) \cdots x_{n_s}(t)]^T \in R^n \quad (2)$$

$$\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t) \cdots u_{n_c}(t)]^T \in R^m \quad (3)$$

其中,  $R^{n_s}$  表示  $n$  维的状态空间,  $R^{n_c}$  表示  $n$  维的控制空间,  $t \in [0, t_f]$ ,  $\mathbf{f} = [f_1 \cdots f_m]^T \in R^n$  是连续可微的函数.系统(1)的初始条件为

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{x}^0 = [x_1^0, \cdots, x_{n_s}^0]^T \in R^n$  表示给定的一组向量.

令  $U$  为所允许的控制信号集合.对于任何的  $u \in U$ , 令  $\mathbf{x}(t|u)$  为相应状态的向量函数,且在区间  $[0, t_f]$  上连续,并几乎能处处满足式(1)和其初始条件式(4).则称  $\mathbf{x}(t|u)$  为系统式(1)所对应于  $u$  的解.

$$\mathbf{J} = \Theta_0(\mathbf{x}(t_f|u)) + \int_0^{t_f} \mathbf{P}_0(t, \mathbf{x}(t|u), \mathbf{u}(t)) dt \quad (5)$$

满足以下约束条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_i(\mathbf{u}) &= \Theta_i(\mathbf{x}(t_f|u)) \\ &+ \int_0^{t_f} \mathbf{P}_i(t, \mathbf{x}(t|u), \mathbf{u}(t)) dt \geq 0, \\ &i = 0, 1, \cdots, N \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\Theta_i$  和  $\mathbf{P}_i, i = 0, 1, \cdots, N$  的向量函数中的实数为实现给定的.我们假设本文中的以下条件得到满足:

条件 1:

$$\mathbf{f}: [0, t_f] \times R^n \times R^m \rightarrow R^n, \Theta_i: R^n \rightarrow R,$$

$$\mathbf{P}_i: [0, t_f] \times R^n \times R^m \rightarrow R, i = 0, 1, \cdots, N$$

条件 2: 存在正数  $N$  满足对于所有的  $(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \in [0, t_f] \times R^n \times V$ , 均有  $|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u})| \leq N(1 + |\mathbf{x}|)$ , 其中  $V \subset R^m$  是  $R^m$  中任意紧致闭子集.

条件 3: 泛函  $\mathbf{f}$  和  $\mathbf{P}_i, i = 0, 1, \cdots, N$ , 关于  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{u}$  的偏导数在  $[0, t_f]$  内均分段连续的.

条件 4:  $\Theta_i, i = 0, 1, \cdots, N$  对于  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{u}$  是连续可微的.首先选取一组单调递增的序列:  $t_{i-1}^p < t_i^p, i = 0, 1, \cdots, n_p$ , 且满足以下方程:

$$t_0^p = 0, t_{n_p}^p = T \text{ 和一组参数 } \sigma_i^p, i = 1, 2, \cdots, n_p, \text{ 构造形如:}$$

$$\mathbf{u}^p(t) = \sum_{k=1}^{n_p} \sigma_k^p \chi_{[t_{k-1}^p, t_k^p)}(t) \quad (7)$$

所示的参数化分段常数控制器.其中,  $p$  是维数,  $\chi_{[t_{k-1}^p, t_k^p)}(t)$  是符号函数, 定义为:

$$\begin{aligned} \chi_{[t_{k-1}^p, t_k^p)}(t) &= \begin{cases} 1, & i \in [t_{k-1}^p, t_k^p) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ \dot{\mathbf{x}}(t) &= \tilde{\mathbf{f}}(t, \mathbf{x}(t), \boldsymbol{\sigma}^p) \end{aligned} \quad (8)$$

其中,

$$\tilde{\mathbf{f}}(t, \mathbf{x}(t), \boldsymbol{\sigma}^p) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t), \sum_{k=1}^{n_p} \sigma_k^p \chi_{[t_{k-1}^p, t_k^p)}(t)) \quad (9)$$

### 2.2 基于 SQP 滤子算法的参数优化改进

采用参数化优化技术可以让函数原点处的约束做平滑的处理,另外约束条件可以转化为与目标函数已知的正则形式,但是最终求解仍然是 SQP 问题,而仿真结果表明优化初值的选取仍然对最后的结果很敏感,由于最后的寻优采用的是传统的 SQP 算法,因此该方法不能明显的提高计算效率.因此,本文在文献[6]的基础上,针对原先算法对初值敏感的情况,修改了参数化寻优的过程,使用一种基于改进的 SQP 滤子算法<sup>[9]</sup>,每次迭代只需解一个二次规划子问题并自动修正了可行方向,并在较弱的条件下保持算法的全局收敛性.

本文采用一种将滤子方法应用线搜索罚函数方法<sup>[10]</sup>:如果罚函数在试探点不能充分地下降,就用滤子方法来放宽接受条件.也就是说,如果约束违反度能够非单调地下降,那么也接受该试探点.这样使得接受一个试探点的条件简单一些.该方法总结了滤子方法和价值函数方法各自的优点,并把它们有机地结合起来,提出一种线搜索的滤子方法.

约束违反度和惩罚函数定义如下:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \|g_i(\mathbf{x})\| + \sum_{i=m+1}^n \max\{0, g_i(\mathbf{x})\} \quad (10)$$

$$\Phi(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \rho h(\mathbf{x}) \quad (11)$$

使用此方法进行 SQP 问题的求解可以不需要可行性恢复阶段,也不需要具有复杂参数的开关条件.

### 3 优化处理技术

由于参数化优化方法对初始状态敏感,实验证明对于不同的初始状态集,求解的速度不同,有时候很容易在短期内陷入局部最优.针对这种情况,我们采用一种初始状态筛选的方法,根据类机器人的特性,在原初始状态集上进行自我碰撞检测、稳定性检测、奇异姿态筛选的处理,最后生成新的初始状态,供参数化优化技术的初始状态输入.流程示意图参考图1所示:

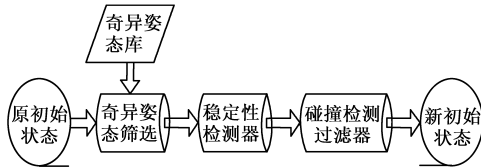


图1 初始状态筛选过程示意图

如图所示,首先建立类机器人的奇异姿态库<sup>[11]</sup>,然后对原始的初始状态集进行奇异姿态的筛选,根据稳定性判断方法对姿态再次进行稳定筛选,通过自身碰撞检测过滤器进行碰撞过滤,最后剩余的状态作为新的初始状态.整个流程的算法如下所示:

步骤1:随机从初始状态全集  $S\{\theta_i^j\}$  中选取一组初始状态  $S\{\theta_i^j\}$ , 其中,  $\theta_i^j \in R \cup (-\pi \leq \theta_i^j \leq \pi)$ ;  $i \in N$ ;  $j \in R$ .

步骤2:判断状态  $S\{\theta_i^j\}$  是否属于奇异姿态库  $S_b\{\theta_i^j\}$ , 若属于,则转步骤6.

步骤3:使用稳定性检测器对状态  $S\{\theta_i^j\}$  进行检测,如果不满足约束条件,转步骤6.

步骤4:使用碰撞检测过滤器对状态  $S\{\theta_i^j\}$  进行判断,如果属于碰撞范围,转步骤6.

步骤5:将该状态作为参数化技术处理的初始输入状态,结束.

步骤6:从原初始状态集中减去该状态  $S\{\theta_i^j\} - S\{\theta_i^j\}$ , 转步骤1.

### 4 基于参数化控制的类人机器人运动控制

根据参数化优化的特点,得到如下的方程<sup>[12]</sup>:

$$\dot{x} = f(x, u),$$

$$x := \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix},$$

$$f(x, u) := \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ A^{-1}(Du - B\dot{\theta}^2 - C\sin\theta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

优化指标函数详见文献[12].

### 5 仿真与实验

仿真所使用的机器人参数如表1所示.

基于参数化优化方法的机器人倒地动作的仿真采用澳大利亚西澳大学 Jennings 教授开发的基于 Matlab 平台的 Miser3 最优化控制工具箱,版本为 Malab Beta Version 2.0.在初值 50(deg/s) 的情况下的仿真寻优时间为 220.75s. 如果采用改进的参数化寻求方式,则在速度上

表1 机器人参数

参数	值	参数	值
$R_0$	0.15m	$P_A$	2000
$R_1$	0.15m	$P_B$	1000
$R_2$	0.30m	$P_C$	200
$R_3$	0.20m	$P_D$	100
$r_0$	0.08m	$P_E$	100
$r_1$	0.07m	$P_F$	100
$r_2$	0.18m	$U_M$	0.2
$r_3$	0.11m	$U_L$	0.8
参数	值	参数	值
$M_1$	1.11kg	$I_1$	0.012kg·m <sup>2</sup>
$M_2$	1.01kg	$I_2$	0.011kg·m <sup>2</sup>
$M_3$	2.14kg	$I_3$	0.096kg·m <sup>2</sup>
$M_4$	1.77kg	$I_4$	0.035kg·m <sup>2</sup>

可以提高至 190.34s. 经过优化之后的类人机器人在初速度 50(deg/s)、80(deg/s) 前提下的倒地仿真过程如图 2 和图 3.

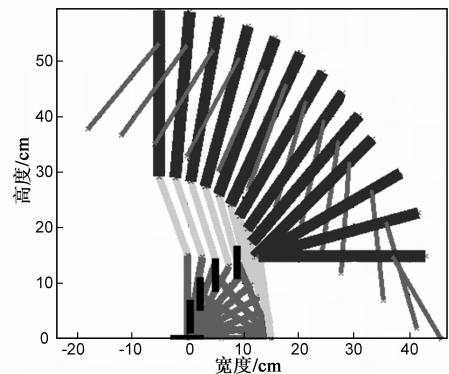


图2 初速度为50deg/s的类人机器人倒地过程仿真图

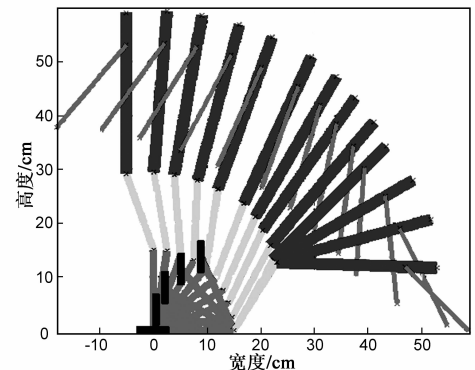


图3 初速度为80deg/s的类人机器人倒地过程仿真图

采用极小值原理、参数优化方法和改进的参数优化方法在寻优时间上的比较如图4所示:

在相同初速度的情况下,极小值原理方法最耗时间,以初速度 50rad/s 为例,大概为 330s 左右,而普通参数化寻优方式则为 250s 左右,采用改进的参数化寻优方式,则为 200s 左右.

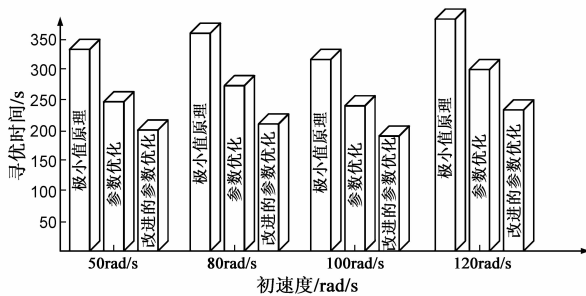
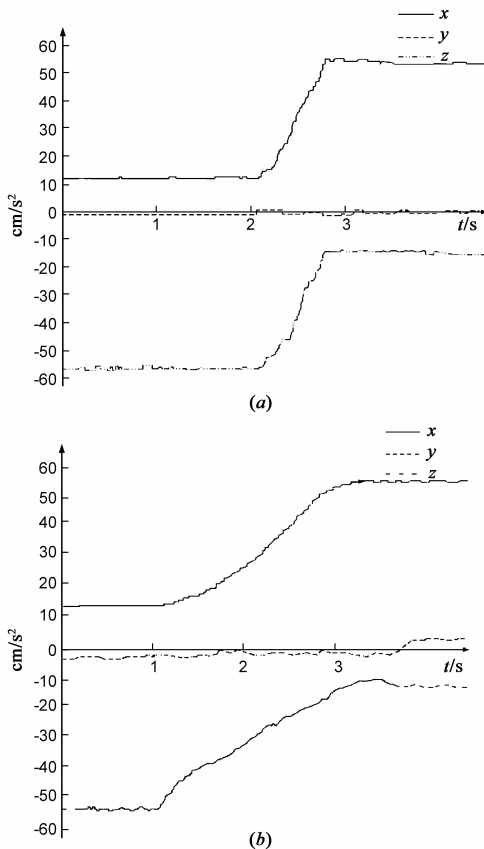


图4 不同控制方法下的寻优时间

为了测试不同优化方法下的倒地动作最优控制性能问题,分别使用极小值原理和参数化优化控制方法对 Nao 型机器人前向倒地进行优化控制, Nao 型机器人前向倒地过程的  $x$ (前向)、 $y$ (横向)和  $z$ (纵向)方向的加速度在极小值原理优化和参数优化控制两种情况下的轨迹如图 5 所示。

图5 Nao型机器人倒地过程中 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的加速度在不同

从图 5 可得,图 5(a)为极小值优化下的机器人三个方向的加速度变化情况,图右边部分为参数化优化下的轨迹.从图 5(b)可以看出,参数化优化下的前向和纵向上的加速度变化都比极小值优化下的轨迹变化要平缓,从而说明在倒地控制过程中,参数化优化控制能更好的缓解倒地地面对机器人所造成的冲击伤害,验证了该优化控制方法对机器人倒地控制的有效性和最优性。

## 6 结论

为减少摔倒对类人机器人带来的伤害,对其倒地动作进行深入分析,并采用最优化控制方法,把倒地控制问题转换成含不等式约束的非线性控制系统问题,针对经典极小值原理在寻优时间和寻优效果上的缺陷,首次引入一种参数优化技术,对类人机器人的向前倒地过程进行优化控制,同时对该方法求解过程中存在的控制系统初值敏感和寻优过程缓慢的缺点,分别采用状态集删选和基于改进的 SQP 求解方法对优化控制进行了改进.通过和极小值原理方法、参数化优化和改进寻优的参数优化方法的比较,实验显示改进的参数优化方法在倒地过程中机器人各个关节的轨迹变化平滑、寻优时间较短、优化效果较好。

## 参考文献

- [1] Guan Y S, Neo E S, Kazuhito Y, et al. Stepping over obstacles with humanoid robots[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2006, 22(5): 958 - 974.
- [2] 刘春阳,谭应清,柳长安,马莹巍.多智能体强化学习在足球机器人中的研究与应用[J].电子学报,2010,38(8): 1958 - 1962.  
LIU Chun-yang, TAN Ying-qing, LIU Chang-an, MA Yin-wei. Application of multi-agent reinforcement learning in robot soccer[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1958 - 1962. (in Chinese)
- [3] 郝宗波,洪炳.未知环境下基于传感器的移动机器人路径规划[J].电子学报,2005,33(5):953 - 956.  
HAO Zong-bo, HONG Bing-rong. Sensor-based path planning for mobile robot in unknown environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 953 - 956. (in Chinese)
- [4] 黄庆成,罗荣华.一种多移动机器人主动协同定位方法的研究[J].电子学报,2010,38(11):2644 - 2648.  
HUANG Qing-cheng, LUO Rong-hua. An active cooperative localization method for mobile robots [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2644 - 2648. (in Chinese)
- [5] 高庆吉,雷亚莉,胡丹丹,于咏生.基于自适应感知复位算法的移动机器人定位[J].电子学报,2007,35(11):2166 - 2171.  
GAO Qing-ji, LEI Ya-li, HU Dan-dan, YU Yong-sheng. A robot localization method based on adaptive sensor resetting algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(11): 2166 - 2171. (in Chinese)
- [6] Teo K L, Jennings L S, Lee H W, et al. The control parameterization enhancing transform for constrained optimal control problems[J]. Journal of Australia Mathethatic Society, 1999, 40(14): 314 - 335.
- [7] Liu X L, Duan G R, Teo K L. Optimal soft landing control for

moon lander[J]. Automatica, 2008, 44 (4): 1097 – 1103.

- [8] 单永正, 段广仁, 吕世良. 月球探测器软着陆的最优控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 117 – 125.

Shan Yongzheng, Duan Guangren, Lv Shiliang. Optimal control for soft landing of lunar probe[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 117 – 125. (in Chinese)

- [9] 张奇. 非线性约束条件下的 SQP 算法的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2008. 22 – 28.

Zhang Qi. Research on SQP Algorithm Under Nonlinear Optimization[D]. Qingdao: Qingdao University, 2008. 22 – 28.

- [10] Fletcher R, Leyffer S, Toint P L. On the global convergence of a trust-region SQP-filter algorithm[J]. SIAM Journal on Optimization, 2002, 13(3): 44 – 59.

- [11] 尾田秀司(日). 类人机器人[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 88 – 94.

- [12] 钟秋波, 潘启树, 洪炳 ■, 朴松昊. 基于参数化最优的仿人机器人倒地运动控制[J]. 机器人, 2009, 31(6): 594 – 599.

Zhong Qiubo, Pan Qishu, Hong Bingrong, Piao Songhao. Falling motion control of humanoid robot based on parametric optimum[J]. Robot, 2009, 31(6): 594 – 599. (in Chinese)

#### 作者简介

钟秋波 男, 1980 年出生, 讲师, 主要研究方向: 类人机器人运动规划与控制.

E-mail: zhongqiubo@yahoo.com.cn



朴松昊(通信作者) 男, 1972 年出生, 副教授, 主要研究方向: 智能机器人.

杨滨 男, 高工, 1988 年毕业于黑龙江大学.