

基于三维线性倒立摆的双足机器人步态规划

李龙澍¹, 王唯翔¹, 王 凡²

(1. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;

2. 合肥师范学院 计算机科学与技术系, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 双足机器人的步态控制策略是保证双足稳定行走的重要条件之一。提出一种基于三维线性倒立摆模型的双足机器人步态规划的算法。首先简化了三维倒立摆模型, 并且假设了步行周期起始状态的 ZMP 位置, 然后通过运动方程推导出含参数的质心与时间的函数, 再将机器人的步态规划简化到每个步行周期, 通过每个周期的初始条件获得函数的相关参数, 最后将此方法推广到带转向的步态规划中, 并应用于实际 Robocup3D 比赛中。实验结果表明该方法具有可行性和有效性。

关键词: 双足机器人; 步态规划; 三维线性倒立摆; Robocup3D

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)06-0066-04

Gait Planning of Biped Robot Based on 3D Linear Inverted Pendulun

LI Long-shu¹, WANG Wei-xiang¹, WANG Fan²

(1. Education Ministry Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing,

Anhui University, Hefei 230039, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Hefei Normal University,

Hefei 230601, China)

Abstract: Gait control strategies are an important factor affecting the walking stability of bipedal robots. Offered a kind of gait planning algorithm of biped robot based on 3D linear inverted pendulum. Firstly, simplify the original 3D inverted pendulum model and suppose the location of the ZMP for the starting state of walking cycle. Secondly the function between centroid and time derived from equations of motion. Then simplify gait planning of biped robot to each walking cycle and get the relevant parameters of the functions through initial conditions for each cycle. Finally, extend this method to the direction of the gait planning. Experimental results demonstrate the feasibility and effectiveness of the approach.

Key words: biped robot; gait planning; 3D linear inverted pendulum; Robocup3D

0 引 言

机器人技术是一门新兴的综合学科,它是计算机技术、电子、机械、自动控制、人工智能等多个领域新技术的综合应用,代表了机电一体化的最新成就,是目前科技发展最活跃的领域之一。机器人并不是简单意义上代替人工劳动,而是综合了人的特长和机器特长的一种拟人的电子机械装置,它比传统机器具有更大的灵活性和更广泛的应用范围。从某种意义上说,它也是机器的进化过程的产物,是未来机械制造业的发展方向。

双足机器人与其它足机器人相比,具有更高的灵活性,更适合在人类的生活环境中与人类协同工作,而不需要专门为其对这些环境进行大规模的改造。此外,社会环境的变化使得双足机器人在护理老人、康复医学及一般家务处理等方面具有很大的潜力^[1-5]。

倒立摆系统是自动控制理论中的典型实验装置和物理模型,它起源于 50 年代,由麻省理工学院的控制理论专家根据火箭发射助推器原理设计出了一级倒立摆试验设备。由于倒立摆系统的行为与火箭以及两足机器人行走有很大的相似性,因而该研究在机器人运动学以及机器人步态规划上有重大的意义^[6,7]。

文中采用三维线性倒立摆模型对机器人进行抽象,通过数学的方法计算出机器人较优的运动轨迹,并将该方法应用在 Robocup3D 机器人足球的实际比赛中进行实验验证。

收稿日期:2010-11-10;修回日期:2011-02-21

基金项目:安徽省自然科学基金(090412054)

作者简介:李龙澍(1956-),男,安徽亳州人,教授,博士生导师,主要从事智能软件、不精确信息处理等方面的研究。

1 基本概念

1.1 三维线性倒立摆

将三维空间的机器人近似为一个由集中了所有质量的点和连接该点与支撑点的无质量的腿组成的倒立摆模型,并且将质心约束在约束平面上进行运动,此约束平面为平行于地面的水平平面, h 为给定的高度,如图1所示。

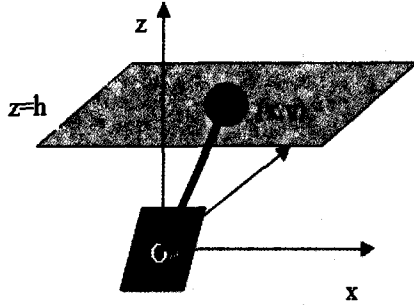


图1 三维倒立摆模型

对于三维倒立摆来说,假设其力矩为0,质心运动仅仅是由支撑力的分力提供,则称这种摆为三维线性倒立摆。

1.2 零力矩点

机器人的静态稳定条件只考虑了垂直方向的重力作用,在速度较高的动态行走时,机器人的瞬时加速度较大,所对应的惯性力对稳定性的影响将不容忽视。为了表征机器人动态行走时的稳定性,vkobraotvci 首先提出零力矩点(ZMP)概念^[8,9],作为动态步行稳定性的评价指标。

仿人机器人在行走过程中,要保持不倾倒就必须使得机器人的ZMP点在稳定的支撑区域内,如图2、图3所示。

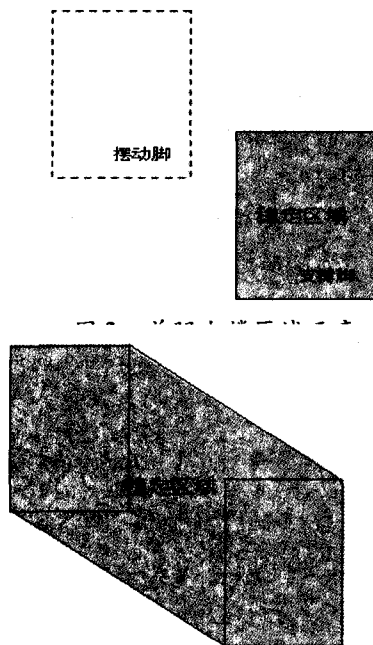


图3 双腿支撑区域示意

如果ZMP点在稳定区域以外,那么机器人将会摔倒,如果ZMP在稳定区域周边,那么轻微的碰撞就可能导致机器人的不稳定,所以必须使得ZMP点位于机器人稳定区域的相对正中心才能保持机器人行走的稳定。

2 算法描述及分析

由上述概念可知,ZMP的位置对于机器人运动的稳定性具有决定意义。因此本算法中,在步行周期的起始状态下使ZMP点在单腿支撑时位于支撑脚的正中心,在双腿支撑时位于支撑区域的正中心,则ZMP点的位置在每个步行周期的开始以及结束的时候是保持在稳定区域的中心^[10,11]。

假设 P_x, P_y 分别为单脚支撑区域的正中心离脚踝的距离,如果脚踝在支撑区域的正中间则 $P_x = P_y = 0$; 则对于三维线性倒立摆,质心在水平方向上的运动方程如下^[12]:

$$\ddot{x} = \frac{g}{h}x \quad (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{h}y \quad (2)$$

其中, \ddot{x}, \ddot{y} 分别为 x 方向, y 方向的加速度, g 为重力加速度, h 为三维线性倒立摆中约束平面的高度。根据微分方程则可解出质心关于时间的函数,如下:

$$x(t) = x(0)\cosh(t/T_c) + T_c\dot{x}(0)\sinh(t/T_c) \quad (3)$$

$$y(t) = y(0)\cosh(t/T_c) + T_c\dot{y}(0)\sinh(t/T_c) \quad (4)$$

$$\dot{x}(t) = \dot{x}(0)/T_c\sinh(t/T_c) + \dot{x}(0)\cosh(t/T_c) \quad (5)$$

$$\dot{y}(t) = \dot{y}(0)/T_c\sinh(t/T_c) + \dot{y}(0)\cosh(t/T_c) \quad (6)$$

其中 $T_c = \sqrt{\frac{h}{g}}$ 。

由式(3)、(4)可知,只要获得每个倒立摆周期的质心的初始位置和初始速度,就可以在一个倒立摆周期内获得质心的所有位置。

由于在实际步行中,一步的距离以及一步的周期是作为给定参数已知的。假设一个步行周期(支撑腿落地到抬起)的时间为 T_s , 一个步行的距离为 $[2x, y]$, $2x$ 表示 X 方向前进的距离, y 表示 Y 方向前进的距离。在这里为了方便计算,假设步行是以支撑点为中心完全对称的,那么 $[2x, y]$ 实际表示为步行周期的起点为 $(-x, 0)$, 终点为 (x, y) 。

在实际行走中由于机器人行走有一定速度,在连贯的状态下,可假设终止速度就是步行周期的起始速度。

将步行距离 $[x, y]$ 以及步行周期 T_s 带入式(3)、(4),可得一个步行周期的终止速度,则有:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C+1)/(T_c S) x \\ (C-1)/(T_c S) y \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $C = \cosh(T_c/h)$, $S = \sinh(T_c/h)$, \dot{x}, \dot{y} 分别表示 X 方向、 Y 方向的速度。

由(7)式可得步行周期的初始速度,将获得初始位置以及初始速度带入(3)、(4)式,即可获得机器人质心运动的轨迹。

在机器人运动中,经常会遇到转向的问题,为了改变行走的方向,需要修改步行距离参数,同时修改速度公式。假设转向角度为 θ ,则对于步行距离 $[x, y]$ 有:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (8)$$

同时公式(7) \dot{x}, \dot{y} 修改成:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (C+1)/(T_c S) x \\ (C-1)/(T_c S) y \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于双足机器人双足的对称性,以及步行本身就是一个循环的过程,所以通过步行参数(步行距离,步行时间)很容易地可以获得步行轨迹,并通过文中提出的算法获得质心轨迹,一旦步行轨迹以及质心位置确定,便可以通过逆运动学的方式获得机器人腿部所有关节的角度,最终完成机器人步态规划。

此外,在实际应用中由于机器人的速度不可能直接达到目标速度,所以前两步需要减小步间距,达到提速的效果。

3 实验及分析

为了验证本算法在机器人步规划以及机器人行走方面的可行性,选取了 Robocup3D 仿真平台进行实验。

Robocup3D 仿真项目是以法国的 Aldebaran 公司的 Nao 双足机器人为原型的仿真平台。

此项目通过物理引擎的模拟较完善模拟了机器人在实

际运动过程中的物理运动,在此项目中开发的代码经过简单的修改就可以直接使用在实际的 Nao 双足机器人上。

实验结果表明,文中提出的算法使得机器人在实际行走时具有较强的稳定性,同时可以通过参数的满足满足多种步态的要求。并将相关技术应用于实际的 Robocup3D 仿真比赛中,在全国以及世界比赛中都取得了较好的成绩。

3.1 机器人直行实验

T_c 选取 0.28s,质心高度选取 0.343m,步幅 x 方向选取 0.19m, y 方向选取 0m, angle 取 0。第一步以及第二步的步幅分别取 x 方向的 1/4, 1/2。质心轨迹以及足底状态见图 4。

3.2 机器人斜向行走实验

选取 T_c 为 0.28s,质心高度选取 0.343m,步幅 x 方向选取 0.14m, y 方向选取 0.6m, angle 取 0。第一步以及第二步的步幅分别取 x 方向的 1/4, 1/2。 y 方向的距离不变。质心轨迹以及足底状态见图 5。



图 4 直行重心轨迹

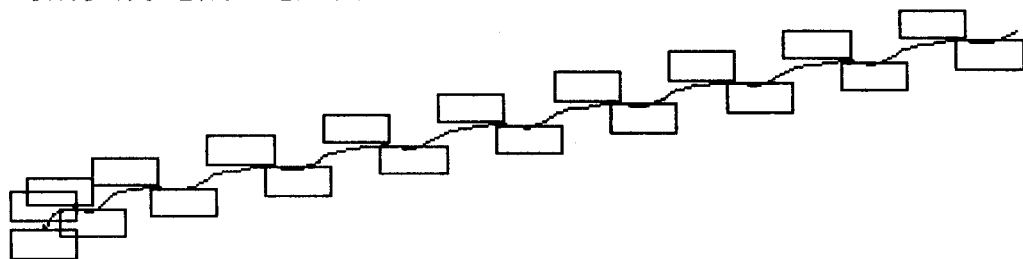


图 5 斜向行走重心轨迹

3.3 机器人转向行走实验

选取 T_c 为 0.28s,质心高度选取 0.343m,步幅 x 方向选取 0.15m, y 方向选取 0m, angle 取 9° ,前 4 步步行距离的选取如表 3 所示:第一步以及第二步的步幅分别取 x 方向的 1/4, 1/2。 y 方向的距离为 0, angle 的角度为 0。质心轨迹以及足底状态见图 6。

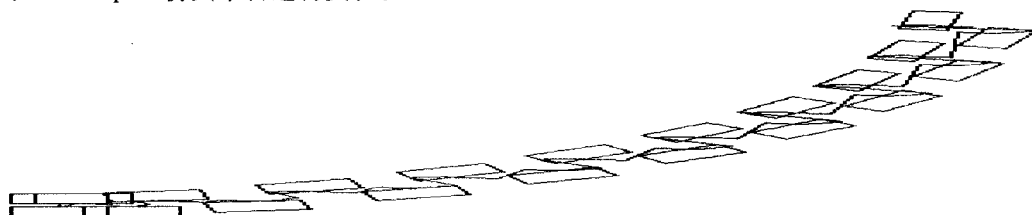


图 6 转向行走重心轨迹

从图4、图5和图6中可以看到质心轨迹以及足底运动完全符合预期,同时质心偏转较小,说明上身姿态被控制在一个较小的范围内,说明机器人的摆动较小,稳定性较强。

4 结束语

文中给出了一种基于三维线性倒立摆的双足机器人步态规划的算法,通过步行距离、步行周期,以及质心高度等参数,获得质心的轨迹。本方法适用于双足机器人的大多数步行方式,特别是对于角度不大的转向运动具有极强的稳定性。本算法忽略了力矩的影响,因为从实际试验来看在转向角度不大的情况下力矩对于ZMP点的影响不大。

参考文献:

- [1] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 张茂川,蔚伟,刘丽丽. 仿人机器人理论研究综述[J]. 机械设计与制造,2010(4):166-168.
- [3] 阮晓钢,仇忠臣,关佳亮. 双足行走机器人发展现状及展望[J]. 机械工程师,2007(2):17-19.
- [4] 谢涛,徐建峰,张永学,等. 仿人机器人的研究历史、现状及展望[J]. 机器人,2002,24(4):862-870.

(上接第65页)

法在实际的应用确实有效。表3是具体的对比统计数据。

表3 统计对比数据

营销主题	原算法聚类数量	改进算法聚类数量	原算法推广成功率	改进算法推广成功率
集团短号推广	10	13	23%	28%
套餐细分推广	10	16	30%	56%
竞争对手客户推广	10	13	33%	48%
客户流失特征分析	10	12	39%	57%

4 结束语

文中给出K-means算法在移动通信行为特征分析客户聚类实例中的应用模式,改进了变量的量纲、维度、聚类数、初始聚点等关键影响因子的计算方法,通过具体项目的实践得到了预期的效果。但影响因子的计算方法不具备普遍适用性,研究具备普遍适用性的影响因子计算方法是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 范英,张忠能,凌君逸. 聚类方法在通信行业客户细分中的应用[J]. 计算机工程,2004,30(12):34-38.
- [2] 王军. 移动通信客户细分研究[D]. 北京:北京科技大学,2006:25-34.
- [3] 刘蓉,陈晓红. 基于数据挖掘的移动通信客户消费行为

- [5] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [6] 张荣松,包家汉. 基于改进遗传算法的机器人路径规划[J]. 计算机技术与发展,2009,19(7):20-23.
- [7] Niku S B. Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications[M]. [s.l.]: Publishing House of Electronics Industry,2006.
- [8] Kajita S, Morisawa M, Harada K, et al. Biped Walking Pattern Generator allowing Auxiliary ZMP Control[C]//Proc. of 2006 IEEE/RSJ Intelligent Robots and Systems. [s.l.]: [s.n.], 2006:2993-2999.
- [9] Harada K, Kajita S, Kanehiro F, et al. Real-Time Planning of Humanoid Robot's Gait for Force Controlled Manipulation[C]//Proc. of ICRA. [s.l.]: [s.n.], 2004:616-622.
- [10] Tan Min, Xu De, Hou Zengguang. Advanced Robot Control[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [11] Kagami S, Kanehiro F, Tamiya Y, et al. AutoBalancer: An On-line Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots[C]//Proc. Int. Workshop Alg. Found. Robot. [s.l.]: [s.n.], 2000.
- [12] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point[C]//Proc. of 2003 Robotics and Automation. [s.l.]: [s.n.], 2003:1620-1626.

分析[J]. 计算机应用与软件,2006,23(2):60-62.

- [4] 汪中,刘贵全,陈恩红. 一种优化初始中心点的K-means算法[J]. 模式识别与人工智能,2009,22(2):153-157.
- [5] 周世兵,徐振源,唐旭清. K-means算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机应用,2010,30(8):145-148.
- [6] 晋幼丽,周明全,王学松. SVM和K-means结合的文本分类方法研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(11):35-37.
- [7] Soper E, Suaanne F. The evolution of segmentation methods in services; where next[J]. Journal of Financial Services Marketing, 2002, 21(8):68-69.
- [8] 周卫星,廖欢. 基于K均值聚类和概率松弛法的图像区域分割[J]. 计算机技术与发展,2010,20(2):68-70.
- [9] Pawan L, Mofrh H. Temporal interval set analysis of clusters of supermarket customers; conventional approach[J]. Information Sciences 2005, 33(3):215-240.
- [10] Georgios P, Dimitrios P. The K-means range algorithm for personalized data clustering in e-commerce[J]. European Journal of Operation Research, 2007, 20(2):177-183.
- [11] 赵敏,倪志伟,刘斌. K-means与朴素贝叶斯在商务智能中的应用[J]. 计算机技术与发展,2010,20(4):179-182.
- [12] 刘英姿,吴昊客. 客户细分研究方法综述[J]. 管理工程学报,2006,20(1):53-57.