

# 人体跨越障碍物的运动生成方法

王小杨,杜晓荣,孙韵琳

(中山大学 电力电子及控制技术研究,广东 珠海 519082)

**摘要:**给出了一种跨越二维障碍物地形的虚拟人体下肢运动的生成方法。首先生成足迹,然后以足迹作为条件,基于简化的腿部模型,分别用不同的方法生成各部分的运动:用曲线拟合脚踝运动轨迹;采用增加约束条件的几何运算生成膝关节运动;采用曲线插值及升阶的方法拟合成脚踝跨越障碍物的运动。介绍了部分实现与实验结果。实验表明,该方法计算量相对较小,有一定的逼真性,适用于二维障碍物地形环境中人体下肢运动的生成。

**关键词:**人体动画;逆运动学;足迹生成;运动控制

**中图分类号:**TP317.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2008)10-0027-04

## A Method to Generate Movement of Human Legs on 2D Terrain with Barriers

WANG Xiao-yang, DU Xiao-rong, SUN Yun-lin

(Institute of Power Electronics & Control Technology, Sun Yat - Sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** Present a method to generate movement of human legs on 2D terrain with barriers. First proposes a new method to generate footprints, and then take the footprints as condition, based on the simplified model of leg to generate different parts of movement by using different methods: synthetically curve presents the ankle trajectory; geometric operations with constraints is used to control knee motion; and the use of curve interpolation method to synthesize the ankle movement to across the barriers. Finally, introduces some of implementation and experimental results. Experiments show that this method has small calculation and high reality, apply to the movement of human legs on 2D terrain with barriers.

**Key words:** human animation; inverse kinematics; footprint planning; motion control

### 0 引言

人体行走一直是计算机图形图像学的一个研究重点,它主要研究人体建模和行为表示。已经有大量文献论述了人体行走和跑步运动的控制方法。早期的很多工作重点在于研究平坦地面上人的运动控制方法,对于障碍物地形中的人体运动的研究相对较少。近几年来,随着虚拟现实及人工智能技术的快速发展和广泛应用,对于有障碍物的二维地形下的人体运动控制的需求越来越迫切。而将一个二维障碍物地形中的人体运动看作是一系列基本的直线运动的拼接并不能保证运动的真实自然性。因此,对二维障碍物地形中的人体运动的研究是非常重要的。

目前,人体运动的方法主要有:正向或逆向运动

学,正向或逆向动力学和基于运动捕捉数据。虚拟人在遇到障碍物时可以采取绕行、踩踏或者跨越的方式行走,文中研究跨越已知障碍物的情况,并采用高层参数的控制机制,将运动路径、步态参数作为输入,通过计算得到人体下肢运动姿态。文中方法特点:采用足迹生成方法生成合理的足迹,该足迹生成方法能够处理遇到不规则障碍物的情况;采用 Bezier 曲线控制摆动脚踝的运动轨迹,控制简单快捷,并且能够较好地反映运动学特征;腿部姿态的确定采用逆运动学方法,通过合理增加几何约束条件保证了解的有效性,并且降低了运算量;在跨越障碍物的时候采用对 Bezier 曲线升阶和插值的方法保证脚踝轨迹的准确性。实验表明,该方法计算量相对较小,有一定的逼真性,适用于实现二维障碍物地形环境中人体下肢运动的生成。

收稿日期:2008-01-14

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(4009762)

作者简介:王小杨(1983-),女,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为计算机仿真与可视化、图形图像应用;杜晓荣,教授,研究方向为计算机仿真与可视化、图形图像应用。

### 1 整体建模

#### 1.1 人体骨架建模

使用一个具有 18 个关节 36 个自由度的简化三

维人体骨架模型<sup>[1]</sup>。该模型由一些刚性连杆构成,这些连杆之间由一些最多具有三个自由度的旋转关节连接在一起,如图 1 为三维人体模型的示意图(对于对称的关节结构只给出一个标注,以图 1 二维侧面简化图作为文中的模型)。

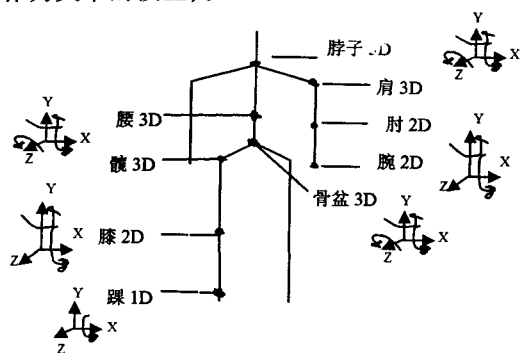


图 1 人体三维模型

## 1.2 人体运动系统实现原理

文中对运动控制采用分层次的控制机制。用户只需输入简单的控制参数:路径、步态,系统便可自动进行足迹规划,并根据足迹生成相应的人体下肢运动。

在运动控制中,基于一种简化的腿部模型,将人体下肢的关节运动分为脚踝、盆骨和膝盖三部分运动状态的结合。对于每一部分运动,分别采用以下方法处理:(1) 脚踝的运动分为触地运动和离地运动,由足迹情况和运动的空间形式确定运动轨迹;(2) 盆骨的运动根据盆骨的自身约束条件采用逆向运动学方法描绘轨迹;(3) 根据盆骨和踝关节的运动轨迹点利用几何关系算出膝盖的运动轨迹。最后,将不同部分的运动合成为人体整个下肢的完整运动。运动的生成过程如图 2 所示。

文中以行走为例介绍人体下肢在遇到障碍物时的生成方法,文中的方法仅是跨越障碍物而不考虑踩踏障碍物的情况,因此障碍物的大小在一个步长之间,或者通过适当的加大步长来弥补,也就是说障碍物的尺寸不会太夸张。

## 2 二维障碍物地形中人体运动的足迹生成

对于两足动物,给定行走时一系列离散的脚步位置(足迹)就可以得到稳定的步态<sup>[2]</sup>。为此,在运动路径上完成人体下肢的行走运动必须进行合理的足迹规划。在平面直线行走运动中,左脚和右脚的的运动可以看成是对称的,因此当给定了运动速度之后,很容易确定运动中每一个足迹。然而,在有障碍物的路径运动中,步长会随着障碍物宽度的变化程度发生相应的变化;摆动腿所需要抬高的高度随着障碍物的高度的变

化程度发生相应的变化:运动者通常是通过增大或者减小步长和抬高脚的高度来实现对障碍物的跨越。因此,需要根据每一步运动高度变化和步长变化确定运动过程中的每一个足迹位置。

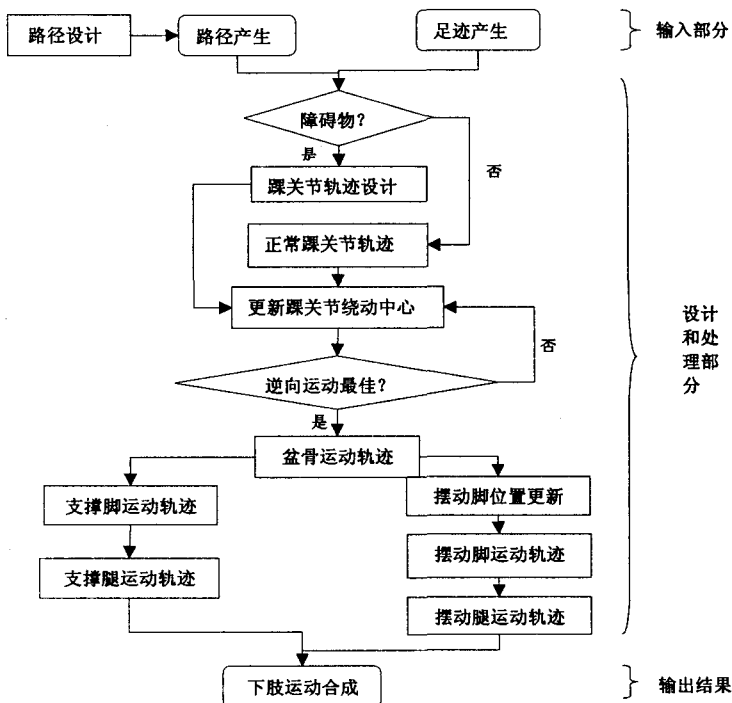


图 2 人体运动系统实现原理图

在文中,用一条高低不平的直线段表示一条运动路径,支撑脚落地时支撑脚踝在水平面的投影表示足迹。为了计算运动过程中下一个实际足迹,首先使用 Bruderlin 和 Calvert 的步长计算公式<sup>[4]</sup>计算下一步的估计步长:

$$\text{Steplength} = \sqrt{0.004 \times S \times \text{body\_height}} \quad (1)$$

$$S (\text{m/min}) = \text{Steplength} \times \text{Stepfrequency} \quad (2)$$

正常人行走时的脚踝离地位置不会过高,一般是脚的长度甚至更低才比较舒适。文中选择脚的长度为步高的估计值。然后根据当前足迹、当前路径障碍物大小及高度和估计步长以及步高确定下一个估计的足迹。如果该估计的足迹不符合当前运动路径,则根据路径方向变化修正估计步长,再重新计算估计的足迹。直到发现估计的足迹符合运动路径,即可确定为实际足迹。计算过程如图 3 所示。

实现此过程的关键首先是对人体跨越障碍物的足迹做处理,以障碍物的最高处为高,并以障碍物水平的边界为长做矩形,足迹就是包围此矩形的弧线,用 Bezier 曲线描述此轨迹。

其次是对跨越时的处理。由于人脚离地的最大高度是小腿的高度,所以设置的障碍物都是在这个高度以下。人体在行走时往往通过减小前一步的步长或者

适当增加本步的步长来跨越眼前的障碍物,与前一步落地脚与障碍物的距离有关。因此分以下 3 种情况做讨论:情况一,障碍物的长度及前一步落地脚与障碍物的距离之和小于步长估计值,则可以直接跨越。情况二,障碍物的长度及前一步落地脚与障碍物的距离之和大于步长估计值,但是障碍物的长度小于步长估计值,可通过减少前一步的步长实际值的方法跨越。情况三,障碍物的长度略大于步长估计值,可通过略增大步长的办法解决,但是步长不能过分增大,要符合人体的约束条件,因此所设置的障碍物也不可以过大。

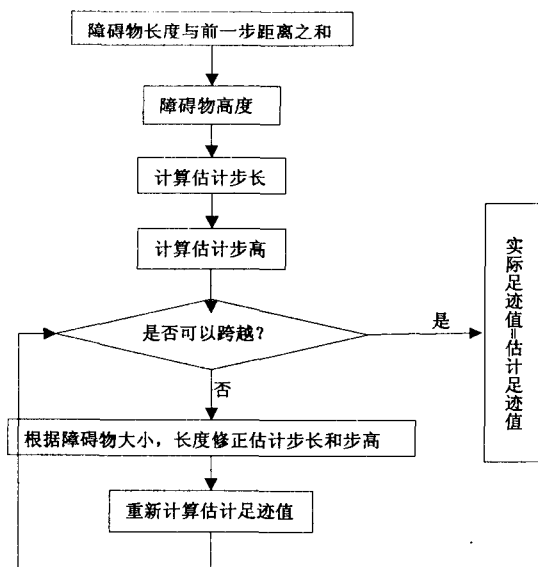


图 3 足迹生成

### 3 下肢运动生成方法

采用逆运动学方法控制下肢运动,对不同位置的关节选择不同的计算规则。根据足迹以及运动过程中的地形等约束条件得到脚踝和盆骨的运动轨迹,结合几何约束条件得到膝关节的运动轨迹,进而合成下肢的完整运动。

#### 3.1 支撑脚的运动

由于脚在实际的行走中脚掌和脚尖之间会有一定的弯曲,但是弯曲的角度很小,因此为了保证其它部分计算的简单和完整性,脚的弯曲角度在文中忽略不计,也就是说支撑脚是完全贴在地面上的,踝关节有一定的弯曲角度<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 摆动脚的运动

##### 3.2.1 无障碍物情况

无障碍物情况下,人在行走过程中,步态观察显示,摆动阶段开始时脚踝逐步抬高,达到最高位置时,脚踝又逐步降低,直到摆动脚落地变为支撑脚。选择脚踝点为控制点,一个摆动周期内脚踝运动的轨迹是一条平滑曲线。

采用二次 Bezier 曲线<sup>[3]</sup>描述摆动脚踝在无障碍物情况下的运动轨迹,基本可以表述上述运动特征,曲线形式描述如下:

$$C(u) = [u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

其中,  $u \in [0, 1]$  表示控制点所在位置分曲线的比例,  $P_0, P_2$  是曲线的起点和终点,  $P_1$  是控制点,文中根据脚的长度及人体行走的生理约束,利用脚踝运动时通过的起始点、结束点和最高点坐标反求得到 Bezier 曲线的控制点,进而得到脚踝的位置坐标。

##### 3.2.2 有障碍物情况

前面已经论述过人体在遇到障碍物时如何跨越,如果障碍物较小可以正常跨越,那么上述方法可以解决脚踝的运动轨迹,关键是解决不可以直接跨越的情况下,脚踝的运动轨迹,跨越轨迹如前面所述是平滑曲线(如图 4 所示)。

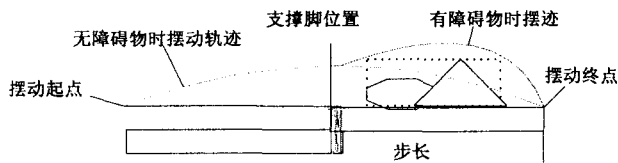


图 4 有障碍物时摆动脚运动轨迹

本情况下依然采用 Bezier 曲线描述此时的摆动脚踝的运动轨迹,但此时的 Bezier 曲线<sup>[4]</sup>为三次,所加的控制点就是由障碍物的最高点反求得到,曲线形式描述如下:

$$C(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

其中,  $u \in [0, 1]$  表示控制点所在位置分曲线的比例,  $P_0, P_3$  是曲线的起点和终点,  $P_1, P_2$  是控制点,根据人体行走的生理约束,利用已知的最高点反求得到的控制点坐标。

选择 Bezier 曲线控制摆动脚踝的运动轨迹。和其他控制曲线相比,具有一些特点:控制曲线不会偏移控制点很远,几乎不会出现例外情况;比起三次参数样条曲线,更容易控制曲线的形状;B 样条曲线虽然可以通过多个控制点更好地控制曲线的形状,但是运算成本很高,而 Bezier 曲线运算简单快捷。从实验结果发现,用这种近似的方法描述关节的运动轨迹得到的运动效果很逼真。因此,这种描述方法是非常有效的。

#### 3.3 盆骨轨迹

盆骨关节是人体行走关节链的另一个终端节点。

盆骨的轨迹在文献[5]中证明此轨迹是用正弦曲线插补的一段弧。在平面行走时,盆骨关节到达最高点是单脚支撑的瞬间,也就是支撑脚保持紧贴地面的水平状态时。盆骨关节到达最低点是在双脚支撑期,双脚支撑期的时间恰恰是在两个连续单脚支撑期的之间,支撑腿在行走过程中起到控制平衡及向前移动的作用。此时,膝盖的弯曲度是计算盆骨位置的关键,由于正常状态下行走时膝盖的弯曲度很小,在遇到障碍物的时候腿又会通过减少膝盖处的弯曲来增高盆骨的位置,因此弯曲度<sup>[6]</sup>可以忽略不计,盆骨的轨迹即根据支撑脚固定点的摆动计算所得。

### 3.4 逆运动学方法求解腿部关节角

确定了盆骨和脚踝的运动,即可根据逆运动学方法确定运动中每一时刻的姿态。根据盆骨、踝关节及腿的长度确定膝关节的角度,由以下的计算公式即可确定膝关节的坐标及踝关节和盆骨关节的角度值,如图 5、图 6 所示。

$$\cos\theta_{Knee} = ((X_{hip} - X_{ankle})^2 + (Y_{hip} - Y_{ankle})^2 - L_{upper}^2 - L_{lower}^2) / (2 * L_{upper} * L_{lower})$$

$$\tan\alpha = (X_{ankle} - X_{hip}) / (Y_{hip} - Y_{ankle})$$

$$\tan\beta = (L_{lower} * \cos\theta_{knee} + L_{upper}) / L_{lower} * \sin\theta_{knee}$$

$$\alpha + \theta_{hip} + \beta = \pi/2$$

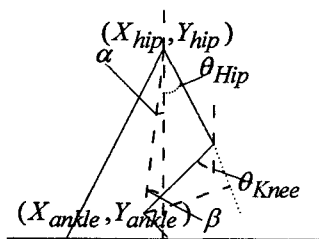


图 5 摆动腿与支撑腿的关系图(摆动腿在支撑腿前)

$$\cos\theta_{Knee} = ((X_{hip} - X_{ankle})^2 + (Y_{hip} - Y_{ankle})^2 - L_{upper}^2 - L_{lower}^2) / (2 * L_{upper} * L_{lower})$$

$$\tan\alpha = (X_{ankle} - X_{hip}) / (Y_{hip} - Y_{ankle})$$

$$\tan\beta = (L_{lower} * \cos\theta_{knee} + L_{upper}) / L_{lower} * \sin\theta_{knee}$$

$$\alpha - \theta_{hip} + \beta = \pi/2$$

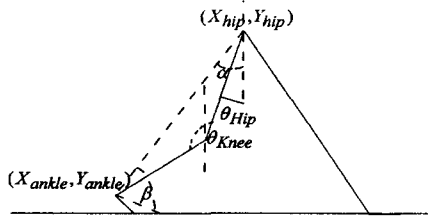
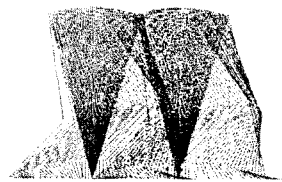


图 6 摆动腿与支撑腿的关系图(摆动腿在支撑腿后)

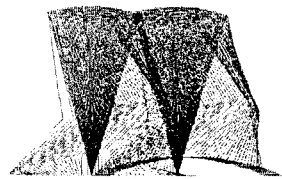
## 4 实验结果与分析

在 2.93GHz 的计算机上,基于 Windows XP 操作系统,采用 Visual Studio 2005 开发工具实现。给出了一些试验结果,图 7(a)是无障碍物情况下人体的正常

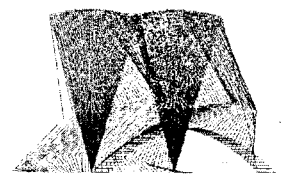
行走;(b)为障碍物长度小于步长,障碍物较低时的情况;(c)为障碍物长度小于步长,高度较大时的情况。



(a) 无障碍物情况下人体的正常行走



(b) 障碍物长度小于步长,障碍物较低时的行走



(c) 障碍物长度小于步长,障碍物较高时的行走

图 7 人体行走姿态图

## 5 结束语

给出了一种主要基于运动学实现的二维障碍物地形中的人体下肢运动方法。基于运动学的方法实现了跨越二维障碍物地形,具有如下主要特点:

1) 用一组直线段描述运动路径能够很容易地反映出运动路径障碍物突变的情况,通过简单的测量即可以判断出足迹的变化程度,根据变化大小调整步长和步高并进行合理的足迹较正。

2) 二次 Bezier 曲线控制摆动脚踝运动轨迹简单便捷,对 Bezier 曲线的插值和升阶又保证了脚踝遇到障碍物时变化的真实性。

3) 在逆运动学求解过程中,通过腿的几何约束,计算出角度和长度,保证了运动正确有效,同时又简化了计算量。

此方法有以下优势:①生成的运动逼真自然、计算量较少,满足虚拟环境应用对人体运动实时性的要求;②控制容易,能够根据较少的控制参数,自动生成相应的人体运动,在运动过程中不需要用户干预;③适用范围广。不仅能够用于平面直线人体运动生成,而且可以用于二维障碍物地形中人体运动生成。

### 参考文献:

[1] 石敏. 三维地形中人体运动生成方法[J]. 系统仿真学

(下转第 33 页)

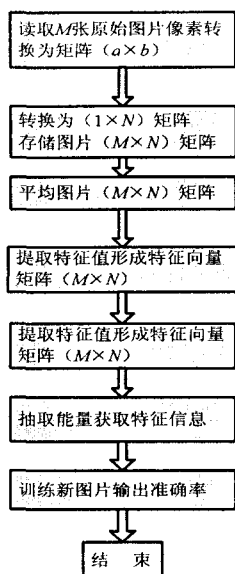


图 1 PCA 算法流程图

像转化成为  $a \times b$  (依据个人要求来定) 像素的矩阵, 然后平均图片来保存所读入的原始数据, 即对图像进行逐行逐列的扫描, 当遇到黑色像素时取其特征值为 1, 遇到白色像素时取为 0, 这样当扫描结束以后就形成了一个维数与图像中像素点的个数相同的矩阵。

(2) 特征提取。利用预处理阶段保存的像素矩阵进行矩阵变换提取特征值, 按照特征值大小按降序排列, 同时按特征值的序列来保存特征值对应的特征向量。

(3) 训练阶段。利用特征值计算出脸部特征坐标, 然后将新读入的图像对特征坐标进行投影, 对图像进行训练获得识别的精度。

### 3 实验数据与结果

在此选用了一部分较小像素的图像作为实例, 图像像素定为  $28 \times 17$ , 原始图像共  $10 \times 5$  组 (在这里采集原始数据更多可以提高准确率), 能量的利用率为 0.9, 测试训练的头像随意选取  $10 \times 5$  组 (组数随意选取), 通过训练测试可以得到结果准确率为 76%, 这个结果比较理想。原始图像和测试图像如图 2、图 3 所示。

### 4 结束语

通过实验可知, 采集的原始数据越多, 像素越大, 识别的准确率就越高, 在笔者的多次试验中有的可以达到 80%~90%。这不仅可以用于人脸的识别, 还可以适用于指纹、手写体数字与字母、车辆牌照等方面的识别。识别准确率的关键在于原始图像库的大小。



图 2 读入的原始图像



图 3 测试图像

### 参考文献:

- [1] 韩利群. 神经网络教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [2] 阎平凡, 张长水. 神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 楼顺天, 施 阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [4] 邹文辉, 袁 晓. 改进的 RBF 神经网络及其在字符识别中的应用[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [5] 苑玮琦, 于清澄. 一种基于改进主成分分析的人脸识别方法[J]. 激光与红外, 2007, 37(5): 478-480.
- [6] 张 媛, 张燕平. 一种 PCA 算法及其应用[J]. 微机发展 (现名: 计算机技术与发展), 2005, 15(2): 69-72.
- [7] 韩 柯, 朱秀昌. 基于二维 PCA 的人脸识别方法研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2007, 27(1): 69-72.

(上接第 30 页)

- 报, 2006(5): 1247-1252.
- [2] Townsend A. Biped Gait Stabilization via Foot Placement[J]. J. Biomechanics, 1985, 18(1): 21-38.
  - [3] Bruderlin A, Calvert T W. Goal-Directed Dynamic Animation of Human Walking[J]. Computer Graphics, 1989, 23: 233-242.
  - [4] 罗笑南, 王若梅. 计算机图形学[M]. 广州: 中山大学出版

社, 2003.

- [5] Girald M. Interactive Design of 3D Computer - Animated Legged Animal Motion[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, 7(6): 39-51.
- [6] 陈隋风, 李蔡彦. Generating Humanoid Lower - Body Motions with Real - time Planning[C] // Computer Graphics Workshop (CG2002). Taiwan: [s. n.], 2002.