

1-15-2021

## Method for Real-time Controllable Step-length Human Leg Continuous Walking Motion Generation

Shuxu Jing

*School of Information Engineering, Change University, 710064, China;*

Zhang Di

*School of Information Engineering, Change University, 710064, China;*

Tinglei Zhang

*School of Information Engineering, Change University, 710064, China;*

Shaoxin Yuan

*School of Information Engineering, Change University, 710064, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Method for Real-time Controllable Step-length Human Leg Continuous Walking Motion Generation

### Abstract

**Abstract:** Based on a free walking description model which is not capable of step length control, an iteration algorithm was proposed for solving the corresponding straight walking motion according to the given single step length which could be continuously adjusted. *The problem of smooth transition between two consecutive walking steps was solved by pose-wise Bezier weighting, which kept the starting and ending poses of a walking step constant.* Continuous straight leg walking motion with continuously varied step length could be generated real-timely. The proposed method provided a solution for real-time continuous leg walking motion generation with known step lengths in a straight line, and a solution for straight walking step planning with known walking distance as well.

### Keywords

human motion animation, real-time motion generation, straight walking, controllable step-length

### Recommended Citation

Jing Shuxu, Zhang Di, Zhang Tinglei, Yuan Shaoxin. Method for Real-time Controllable Step-length Human Leg Continuous Walking Motion Generation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1190-1198.

## 实时可控步长人体腿部连续走动运动生成方法

荆树旭, 张迪, 张廷磊, 袁绍欣

(长安大学信息工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 基于一个不具备精确步长控制的人体自由走动描述模型, 提出一种根据单步步长求解对应直线走动运动的迭代算法, 步长连续可变。对于相邻不同步长走动运动之间的平滑过渡问题, 采用具有保边界特性的 Bezier 姿势加权进行解决, 能够实时生成可控步长的人体腿部连续直线走动运动。在已知步长序列条件下, 实时生成腿部连续直线走动运动; 能够在已知直线走动距离条件下, 实时规划走动步长与走动步数并完成走动运动的实时生成。通过一个连续跨沟直线走动的实时生成实例验证了提出方法的有效性。

**关键词:** 人体动画; 实时运动生成; 直线行走; 可控步长

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1190-09

DOI: 10. 16182/j. cnki. joss. 2015. 06. 005

### Method for Real-time Controllable Step-length Human Leg Continuous Walking Motion Generation

Jing Shuxu, Zhang Di, Zhang Tinglei, Yuan Shaoxin

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on a free walking description model which is not capable of step length control, an iteration algorithm was proposed for solving the corresponding straight walking motion according to the given single step length which could be continuously adjusted. The problem of smooth transition between two consecutive walking steps was solved by pose-wise Bezier weighting, which kept the starting and ending poses of a walking step constant. Continuous straight leg walking motion with continuously varied step length could be generated real-timely. The proposed method provided a solution for real-time continuous leg walking motion generation with known step lengths in a straight line, and a solution for straight walking step planning with known walking distance as well.

**Keywords:** human motion animation; real-time motion generation; straight walking; controllable step-length

## 引言

现实世界中的人体运动是人体与物理环境之间相互作用的复杂力学过程,“走”是最节约能量从而也是最常用的双足运动方式之一<sup>[1]</sup>,制作虚拟角色的连续走动是动画制作的一个重要方面。人体走动动画制作所需的是作为走动结果记录的运

动数据,人工操作生成这种具有协调特性的高维时变数据以适应变化的虚拟环境面临很大的困难,是人体动画制作和防人机器人运动控制领域的一个重要研究内容<sup>[2-3]</sup>。一个连续走动运动可以表示为  $M(t)=\{P(t),T(t)\}$ ,  $M(t)$  表示走动运动,  $t$  表示时间,  $P(t)$  表示  $t$  时刻的人体姿势,  $T(t)$  表示  $t$  时刻的人体位置,  $T(t)$  由足部支撑约束和  $P(t)$  决定。给定骨骼结构后,  $P(t)$  可以用  $\theta(t)=[\theta_0(t),\theta_1(t)\dots\theta_{n-1}(t)]$  等价表示,  $\theta_i(t)$ ,  $i=0, 1, 2 \dots n-1$  表示人体关节的第  $i$  个旋转自由度的旋转值,  $n$  为关节旋转自由度数目。  $T(t)$ ,  $P(t)$  具有随时间变化的连续性、约束性,  $\theta_i(t)$  之间



收稿日期: 2014-04-30 修回日期: 2014-08-15;  
基金项目: 陕西省自然科学基金(20120849);  
中央高校基金(2013G1241108; CHD2011JC068);  
作者简介: 荆树旭(1978-), 男, 河南新乡人, 博士,  
副教授, 研究方向为人体制作与合成; 张迪(1987-),  
女, 宁夏青铜峡人, 硕士生, 研究方向为数据驱动的人体运动合成; 张廷磊(1992-), 男, 河南商丘人, 回族, 硕士生, 研究方向为人体运动中的逆向运动学方法。

<http://www.china-simulation.com>

• 1190 •

具有随时间变化的协调性。运动捕捉得到的  $M(t)$  是人真实走动的结果记录, 保证了  $M(t)$  的连续性、约束性与协调性。利用动画制作软件(如 Maya)通过交互姿势设定制作  $M(t)$  需要借助 Rotoscoping 技术<sup>[4]</sup>辅助才能保证  $M(t)$  的连续性、约束性与协调性。动力学物理仿真方法, 如 Yin 等<sup>[5]</sup>提出的 SIMBicon 模型(有限状态机 FMS 结合比例微分 PD 控制方法)能得到固定步长的走动  $M(t)$ , 并且能够保证其连续性、约束性与协调性。

运动捕捉和交互方式得到的走动  $M(t)$  只适用于特定虚拟环境, 步长和步数具有不可变性。虚拟环境一旦发生变化(导致步长/步数也要变化), 运动捕捉方式需要重新设置物理环境并重新捕捉来满足变化需求; 交互姿势设定需要重新准备所需的走动原型并重新交互来满足变化需求。动力学物理仿真需要反复调整-优化模型的参数并执行仿真过程来满足变化需求。3 种方式都需要付出很大代价来满足变化步数和步长需求, 并且难以实现实时的走动运动生成。

本文在 Boulic 等<sup>[6]</sup>提出的自由走动描述模型基础上, 提出一种可控步长的人体腿部连续直线走动运动实时生成方法, 该方法能更好地适应变化虚拟环境条件下的人体动画制作。本文的贡献有以下 3 点: (1) 解决了直线走动条件下可控步长双腿连续走动运动的实时生成; (2) 能够解决给定走动距离前提下的步数与步长的实时规划; (3) 通过设置随机的小幅步长扰动, 可以克服生成的走动运动周期性单调重复问题。

## 1 相关研究工作

当前研究中的人体运动生成方法主要有 3 类, 数据驱动方法<sup>[7-8]</sup>、物理仿真方法<sup>[9-10]</sup>和运动学描述方法<sup>[6]</sup>, 3 类方法都具有一定的变步长走动运动生成能力。数据驱动方法需要很大的不同步长走动数据集; 物理仿真方法需要以模型的初始参数(能生成固定步长的走动)为起点, 然后仿真得到结果, 根据结果步长与目标步长的差距反复迭代调

整模型参数并执行仿真过程; 运动学方法在当前研究中主要集中在基于逆向运动学的运动帧编辑方面<sup>[3]</sup>, 本文研究运动学描述方法在可控步长连续走动运动实时生成方面的能力。

### 1.1 数据驱动方法

数据驱动方法中, 基于“帧重排”思想的运动图(Motion Graphs)方法提出后在学术界得到了广泛的研究<sup>[10]</sup>, Reitsma 等<sup>[11]</sup>对运动图方法做了系统的总结, 该类方法对变步长走动的支持能力取决于走动数据集  $\{M_i(t) | i=0, 1, 2 \dots n-1\}$  对步长的覆盖程度, 具有步长变化不连续性。相比传统运动图的“帧重排”思想, Ren 等<sup>[12]</sup>提出的方法更侧重运动片段的重排。运动图方法将变步长走动问题转化为一个基于步长标注的图搜索问题, 搜索结果在满足目标步长方面具有一定程度的不确定性。

Wei 等<sup>[13]</sup>基于大量相似的运动数据学习了一个时空约束参数与运动数据之间的概率映射模型, 即建立低维的高层运动参数与底层的高维运动数据  $P(t), T(t)$  之间的映射关系, 将走动运动的步长约束转化为最大先验概率匹配问题。通过设定走动步长后, 以步长为条件从走动样本数据中查找与目标步长最接近的走动数据片段, 查找结果取决于样本数据的量和步长分布, 该方法适用于离线的变步长走动合成。

### 1.2 物理仿真方法

物理仿真方法中, 具有代表性的工作是 Yin 等<sup>[5]</sup>根据人类走-跑的经验数据提出的一个鲁棒性良好平地走-跑控制器 SIMBicon (FMS + PD)。FMS 由有限个通过关节旋转角定义的身体姿势, 即关键时刻  $t^i$  对应的  $\theta(t^i)$  构成,  $i = 0, 1, 2 \dots n-1, n$  为 FMS 的状态数目。关节转矩  $\tau = k_p(\theta(t^i) - \theta(t)) + k_d\dot{\theta}(t)$ , 其中  $k_p$  为状态差增益,  $k_d$  为状态变化率增益,  $\tau$  驱动当前姿势  $\theta(t)$  向目标姿势  $\theta(t^i)$  转化。走动控制器的 FMS 状态数为 4, 即  $\{\theta(t^i) | i = 0, 1, 2, 3\}$ , 是一个固定步长的走动控制器, 仿真得到的走动  $M(t)$  能够保证走动的连续性、约束性与协调性。

Coros 等<sup>[14]</sup>在 SIMBicon 模型基础上, 通过参数调整-优化生成变步长的走动  $M(t)$ , 模型参数变化导致的结果步长需要执行仿真过程才能得到。为得到目标步长且满足连续性、约束性和协调性的走动  $M(t)$ , 需要迭代调整-优化模型参数并执行仿真过程, 优化与仿真的计算代价较大。Wang 等<sup>[15]</sup>在 SIMBicon 模型基础上, 通过迭代优化调整参数得到了具有不同风格的不同步长走动控制器, 但没有涉及不同步长走动  $M(t)$  之间的衔接问题。

### 1.3 运动学描述方法

运动学描述方法不考虑运动的力学因素, 根据走动运动的大量统计数据, 直接描述  $M(t)$  中的人体姿势  $P(t)$  和位置  $T(t)$  之间的函数关系。Boulic 等<sup>[6]</sup>提出了一个无约束的自由走动  $M(t)$  描述模型, 该模型提供了高层走动参数归一化速度、步周期、归一化步长与由底层关节转角参数  $\theta(t\%)$  决定的姿势  $P(t\%)$  之间的函数关系,  $t\%$  为一个走动周期内的相对时间。Boulic 在论文中指出该模型不具备落脚点位置控制能力, 本文在该模型基础上增加落脚点的位置控制、可控步长走动  $M(t)$  的生成、相邻不同步长  $M(t)$  之间的平滑过渡, 具有实时变步长连续直线走动  $M(t)$  生成能力。通过一个连续的跨沟直线走动实时生成实例验证了提出方法的有效性。

## 2 提出的方法

### 2.1 Boulic 走动模型简述与分析

#### 2.1.1 基本模型

Boulic 模型描述了一个走动周期的时间-空间结构, 周期以  $Dc$ (Duration of Cycle)表示, 周期内时间用  $[0\%, 100\%]$  的相对时间  $t\%$  表示。以左脚跟着地(左脚 HS, 即 Heel Strike)为相对时间  $0\%$ , 从  $t\% = 0\%$  到右脚趾离开地面(右脚 TO, 即 Toe Off)为双脚支撑阶段  $Dds$ (Duration of double support), 从  $t\% = 0\%$  到左脚 TO 为左脚支撑阶段  $Ds$ (Duration of support), 从左脚 TO 到  $t\% = 100\%$  为左脚平衡阶段  $Db$ (Duration of balance), 即摆动阶段。右腿运

动滞后左腿 50% 的相对时间。高层走动参数: (1) 走动速度  $RV$ (Relative Velocity)根据腿长归一化; (2) 双步长  $RL$ (Relative Length)也根据腿长归一化。这些量之间的关系由公式(1)-(5)描述。

$$RL=1.346 \cdot \text{Sqrt}(RV) \quad (1)$$

$$Dc=RL/RV \quad (2)$$

$$Ds=0.752 \cdot Dc-0.143 \quad (3)$$

$$Db=0.248 \cdot Dc+0.143 \quad (4)$$

$$Dds=0.252 \cdot Dc-0.143 \quad (5)$$

本文使用的腿部模型同 Boulic 模型, 包含脊柱、髋关节、膝关节和踝关节。局部坐标系(即和人体相关联的坐标系)原点在脊柱, Y 轴向上, X 轴向左, Z 轴向前。腿部骨骼结构参数用各关节在局部坐标系中的偏移量表示, 具体见表 1, 对应人体站立姿势。一个走动周期内的姿势  $P(t\%)$  由各个关节相对站立姿势的旋转角度  $\theta(t\%)$  决定, 各个关节的转轴平行于局部坐标系的 X 轴。各个关节的旋转角度  $\theta(t\%)$  由  $RV$  决定, 将  $RV$  分为 3 个区间 A  $[0.0, 0.5]$ 、B  $[0.5, 1.3]$ 、C  $[1.3, 3.0]$  并采用分段函数描述  $RV$  与  $\theta(t\%)$  之间的函数关系,  $\theta(t\%)$  随时间变化的函数关系简述见附录 A。

基本模型是一个无约束的自由走动模型, 描述了  $M(t)$  中的  $P(t)$  要素变化的连续性与协调性, 但缺少对  $M(t)$  中的  $T(t)$  要素的精确描述。特定范围内的  $RV$  能够满足脚部支撑约束, 实现结果表明当  $rv=1.0$  时, 基本感觉不到视觉滑动现象。当  $rv$  超出特定范围, 将导致脚相对地面明显的滑动现象, 当  $rv$  从 0.2 均匀变化到 2.5, 有很明显的脚与地之间的滑动现象。

表 1 腿部骨骼结构参数

左腿参数	右腿参数
LHip(0.178,-0.178,0.0)	RHip(-0.178,-0.178,0.0)
LKnee(0.178,-0.644,0.0)	RKnee(-0.178,-0.644,0.0)
LAnkle(0.178,-1.178,0.0)	RAnkle(-0.178,-1.178,0.0)
LToe(0.178,-1.178,0.20)	RToe(-0.178,-1.178,0.20)

#### 2.1.2 基本模型中的 $RV$ 、 $RL$ 和 $Dc$ 调节

从严格意义上讲, 基本模型中唯一可调节的参

数是 RV, 为得到更多的走动运动, Boulic 提供了一种 RV、RL 和 Dc 的调节方法。3 个量之间的基本关系为  $RV=RL/DC$ : (1) RV 变化时, 根据基本模型调节其它参数; (2) RL 变化时, Dc 固定并根据基本关系调节 RV; (3) Dc 变化时, RL 固定并根据基本关系调节 RV; (4) RL 和 Dc 同时变化时, 根据基本关系调节 RV。后 3 种调节方式将违背基本模型中公式(1)指定的关系, 这种冲突导致的问题仍然是走动时的脚与地面见的滑动问题。

## 2.2 支撑阶段的脚地非滑动约束满足

Boulic 模型在描述走动  $M(t)$  中的  $P(t)$  要素方面性能良好, 但在精确步长或落脚点, 即  $M(t)$  中的  $T(t)$  要素控制方面, 无论是基本模型还是 RV、RL 和 Dc 参数调节都没有提供。根据观察经验, 人走动过程中在 Ds 阶段逐渐从脚跟支撑转换到脚趾支撑, 本文将 Ds 阶段进一步分为脚跟支撑阶段 Dhs(Duration of heel support) 和脚趾支撑 Dts(Duration of toe support) 2 个阶段, 2 个阶段转换过程中存在脚与地面平行的状态, 以该状态的出现作为 Dhs 向 Dts 转换的时间点, 通过公式(6)判断, 即脚跟和脚趾的垂直距离小于阈值  $\varepsilon_{\text{fpg}}$  (foot parallel to ground)。

$$\|y_{\text{heel}} - y_{\text{toe}}\| < \varepsilon_{\text{fpg}} \quad (6)$$

给定  $RV=rv$  和相对时间  $t\%$ , 根据正向运动学 FK (Forward Kinematics) 结合 Boulic 基本模型计算脚跟在全局坐标系中的位置  $P_h^L(x,y,z)$  和脚趾在全局坐标系中的位置  $P_t^L(x,y,z)$ , 用公式(7)和(8)表示。

$$P_h^L(x,y,z) = f_h(rv, t\%) \quad (7)$$

$$P_t^L(x,y,z) = f_t(rv, t\%) \quad (8)$$

以左脚为例, 在 Dhs 阶段保持  $P_h^L(x,y,z)$  在全局坐标系中的坐标不变, 以前后 2 帧  $P_h^L(x,y,z)$  和  $P_h^L(x_{(t+\Delta t)\%}, y_{(t+\Delta t)\%}, z_{(t+\Delta t)\%})$  的差计算局部坐标系原点在局部坐标系中的位移增量  $\Delta P^G(O_{LX}, O_{LY}, O_{LZ})$ , 见公式(9)。

$$\Delta P^G(O_{LX}, O_{LY}, O_{LZ}) = P_h^L(x_{t\%}, y_{t\%}, z_{t\%}) - P_h^L(x_{(t+\Delta t)\%}, y_{(t+\Delta t)\%}, z_{(t+\Delta t)\%}) \quad (9)$$

根据  $rv$  和  $t\%$  计算所得的姿势  $P((t+t)\%)$  保持不变。在 Dts 阶段则保持  $P_t^L(x,y,z)$  在全局坐标系中的坐标不变,  $\Delta P^G(O_{LX}, O_{LY}, O_{LZ})$  计算类似。在右脚 HS 时刻以后,  $\Delta P^G(O_{LX}, O_{LY}, O_{LZ})$  的计算以右脚为准, 计算方法同左脚。

## 2.3 单步走动步长控制

Boulic 模型根据 RV 能够得到连续协调的姿势  $P(t)$ , 结合脚与地面的非滑动约束可以计算单步走动步长 SL (Step Length)。步长控制需要解决的问题是根据给定的步长 SL 计算 RV, 进而计算  $P(t)$ ,  $T(t)$  得到  $M(t)$ 。

### 2.3.1 单步长 SL 的计算

根据 Boulic 基本模型(即仅调整 RV), 结合 2.2 小节脚支撑阶段的脚与地面的非滑动约束方法, 一种选择是计算一个单步走动周期 Dssc(Duration of single step cycle, 为半个 Dc) 内  $\Delta P^G(O_{LX}, O_{LY}, O_{LZ})$  在前进方向上的累加和, 该和为精确的 SL。为提高计算效率, 结合观察经验, 本文采用 Dc 内相对时间  $t\% = 50\%$  (或  $t\% = 0\%$ ) 处的姿势  $P(50\%)$  (处于双脚支撑 Dds 阶段) 近似计算 SL, 具体见公式(10), 以  $P(50\%)$  在 Z 方向(即前进方向)上的左右脚跟之间的距离  $SL^\circ$  近似 SL (示意图 1):

$$SL^\circ = \|P_h^L(x_{50\%}, y_{50\%}, z_{50\%})_{\text{left}} - P_h^L(x_{50\%}, y_{50\%}, z_{50\%})_{\text{right}}\| \quad (10)$$

实验结果表明  $SL^\circ$  对 SL 的近似偏小, 即存在一定的误差  $\Delta E_{SL}$ , 当走动距离较长时, 该误差的累积效应将会有视觉显现。该误差与  $SL^\circ$  存在近似线性关系, 见公式(11), 经过简单修正后可以克服该误差的累积效应。

$$\Delta E_{SL} = k \cdot SL^\circ \quad (11)$$

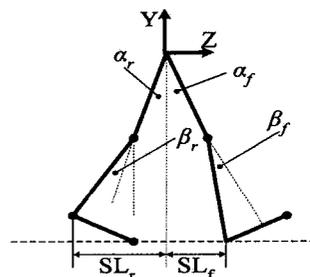


图 1 腿部关节转角与单步长关系示意图

### 2.3.2 由 SL 确定 RV

在双脚支撑 Dds 阶段( $t\% = 50\%$  或  $t\% = 0\%$ )的姿势变化(即关节转角  $\theta(50\%)$  变化)是步长变化的原因,因此 RV 在 A、C 区间的变化均具备步长调节能力(参看附录 A 及文献[6])。在 C 区间内, $\theta(50\%)$  的有效变化范围为膝关节从  $70^\circ \sim 65^\circ$ ,步长调节能力非常有限;踝关节在  $t\% = 50\%$  处的变化对步长的影响也较小。因此本文以 RV 在 A 区间的变化进行步长的控制,同时忽略踝关节的影响。以图 1 进行说明, $t\% = 50\%$  时,前腿(即左腿)髌关节的旋转角度  $\alpha_f$ 、前腿膝关的旋转角度  $\beta_f$ 、后腿(即右腿)髌关节的旋转角度  $\alpha_r$ 、后腿膝关节的旋转角度  $\beta_r$  与 RV 之间的关系分别为(推导需要参考附录 A 中的 Hermit 插值,具体过程较为简单,本文省略): (1)  $\alpha_f = -30 \cdot rv$ ; (2)  $\alpha_r = 565/27 \cdot rv$ ; (3)  $\beta_f = 680/49 \cdot rv + 725/343$ ; (4)  $\beta_r = 3$ 。单步走动步长 SL 与  $\alpha_f$ ,  $\alpha_r$ ,  $\beta_f$ ,  $\beta_r$  之间的关系为:

$$\begin{aligned} SL = SL_r + SL_f = & LH \cdot \sin(\alpha_r) + LL \cdot \sin(\alpha_r + \beta_r) - \\ & LH \cdot \sin(\alpha_f) + LL \cdot \sin(-\alpha_f - \beta_f) = \\ & LH \cdot [\sin(565/27 \cdot rv) + \sin(30 \cdot rv)] + LL \cdot \\ & [\sin(790/49 \cdot rv - 825/343) + \\ & \sin(565/27 \cdot rv + 3)] \end{aligned}$$

其中 LH 为大腿长度, LL 为小腿长度,该函数关系用公式(12)简化表示:

$$SL = f(rv) \quad (12)$$

$t\% = 50\%$  时,各关节的旋转角度是  $rv$  的函数(具体关系参看附录 A),该函数关系用公式(13)表示:

$$\theta(50\%) = g(rv) \quad (13)$$

由公式(12)容易证明当  $rv$  在  $[0.0, 0.5]$  范围内变化时,SL 随  $rv$  变化单调递增,证明见附录 B。根据该单调性,本文通过中值迭代求解满足给定目标步长  $SL = sl^*$  的目标  $RV = rv^*$ 。给定  $rv$  由公式(13)可以求解出  $t\% = 50\%$  时的腿部各关节转角(即姿势),结合 2.3.1 小节求解对应  $rv$  的步长  $sl$ ,具体算法如下:

算法 1. 根据目标  $sl^*$  求解目标  $rv^*$  的中值迭

代算法。

输入: 目标单步步长  $sl^*$

输出: 目标  $rv^*$

符号说明:  $rv_{high}$  表示迭代过程中 RV 的大值;  $rv_{low}$  表示迭代过程中 RV 的小值;  $rv_{cur}$  表示迭代过程中 RV 的当前值;  $(\alpha_f, \alpha_r, \beta_f, \beta_r)_{cur}$  表示迭代过程中根据  $rv_{cur}$  计算的 4 个腿部关节转角;  $sl_{cur}$  表示迭代过程中的当前步长。

步骤:

$$rv_{high} = 0.5;$$

$$rv_{low} = 0.0;$$

$$rv_{cur} = (rv_{high} + rv_{low}) / 2;$$

$$(\alpha_f, \alpha_r, \beta_f, \beta_r)_{cur} = g(rv_{cur}); // \text{根据公式(13)}$$

$$sl_{cur} = f(rv_{cur}); // \text{根据公式(12)}$$

WHILE ( $\|sl_{cur} - sl^*\| > \epsilon_{sl-thr}$ ) {

IF ( $sl_{cur} > sl^*$ )

THEN  $rv_{high} = rv_{cur}$ ;

ELSE  $rv_{low} = rv_{cur}$ ;

$$rv_{cur} = (rv_{high} + rv_{low}) / 2;$$

$$(\alpha_f, \alpha_r, \beta_f, \beta_r)_{cur} = g(rv_{cur}); // \text{根据公式(13)}$$

$$sl_{cur} = f(rv_{cur}); // \text{根据公式(12)}$$

}

$$rv^* = rv_{cur};$$

SL 随 RV 变化单调递增的性质保证算法 1 必定收敛。

## 2.4 变步长连续直线走动运动生成

根据 2.2 小节提出的脚地之间的非滑动约束满足方法、由目标步长  $sl^*$  求解对应  $rv^*$  的算法 1, 基于 Boulic 走动描述基本模型, 可以得到具有连续性、约束性和协调性保证的目标步长走动运动  $M(t)$ 。图 2 是不同走动步长 SL 在相对时间  $t\% = 0\%$  时刻(即双脚支撑 Dds 阶段)对应的姿势(将  $t\% = 0\%$  时刻的左右腿换位便得到  $t\% = 50\%$  时刻的姿势)。变步长连续走动需要解决: 由第  $i$  个单步对应步长  $sl_i$  在 Dds 阶段(本文选取  $t\% = 0\%$  和  $t\% = 50\%$ ) 的对应姿势  $P_i(0\%)$  (或  $P_i(50\%)$ ) 平滑过渡到下一单步对应

步长  $sl_{i+1}$  在 Dds 阶段的对应姿势  $P_{i+1}(50\%)$  (或  $P_{i+1}(0\%)$ ) 问题, 具体方法见 2.4.1 小节。

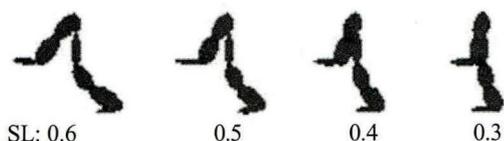


图 2 不同步长对应的  $t\%=0\%$  时刻的姿势

### 2.4.1 基于 Bezier 加权的姿势生成

Bezier 加权公式为  $O(u) = \sum_{i=0}^n O_i \cdot B_{i,n}(u)$ , 其中的  $O_i$  为  $n+1$  个已知的对象, 各个  $O_i$  对象对应的权重  $B_{i,n}(u) = C_n^i (1-u)^{n-i} \cdot u^i$  为 Bernstein 基函数, 参数  $u$  的变化区间为  $[0.0, 1.0]$ 。Bezier 加权具有保边界特性, 即当参数  $u$  分别取 0.0 和 1.0 时, 加权结果为  $O(0.0)=O_0$ ,  $O(1.0)=O_n$ 。本文使用不同步长相对时间相同的姿势  $P_i(t\%)$  为加权对象,  $P_i(t\%)$  由左/右髋、左/右膝、左/右踝关节绕平行于局部坐标系 X 轴的 6 个旋转角度定义。

以图 3 进行说明, 给定第  $i$  个单步 (相对时间  $t\%=0\%$  或  $t\%=50\%$  处) 步长  $sl_i^*$  和下一个即第  $i+1$  个单步 (相对时间  $t\%=0\%$  或  $t\%=50\%$  处) 步长  $sl_{i+1}^*$  后,  $sl_i^* \sim sl_{i+1}^*$  按大小顺序选取若干个单步步长, 假设为  $m$  个, 则共计有  $m+2$  个步长。通过算法 1 可以得到  $m+2$  个  $rv^*$ , 根据 Boulic 基本走动模型, 可以产生  $m+2$  个不同步长的走动  $P(t\%)$ , 以步长  $sl_i^*$  到  $sl_{i+1}^*$  的顺序将  $m+2$  个  $P(t\%)$  排序, 在  $[0\%, 50\%]$  内分别从  $m+2$  个  $P(t\%)$  中选取相对时间  $t\%$  相同的  $m+2$  个姿势  $P_i(t\%)$ ,  $i=0, 1 \dots m+1$  进行 Bezier 加权得到最终的结果姿势  $P(t\%)$ , 参数  $u = t\% \cdot 2$ , 具体见公式(14):

$$P(t\%) = \sum_{i=0}^{m+1} P_i(t\%) \cdot B_{i,m+1}(t\% * 2) \quad (14)$$

由 Bezier 加权的保边界性质有: 1) 当  $t\%=0\%$  时, 公式(14)的加权结果为  $P_0(0.0)$ , 即步长为  $sl_i^*$  在相对时间 0% 的姿势  $P(0\%)$  (图 3 中的右上角姿势); 2) 当  $t\%=50\%$  时, 公式(14)的加权结果为  $P_{m+1}(50\%)$ , 即步长为  $sl_{i+1}^*$  在相对时间 50% 的姿

势  $P(50\%)$  (图 3 中的最下一行的中间姿势)。1), 2) 保证了走动步长满足给定步长的要求。Bernstein 基函数的连续性能保证加权所得结果  $P(t\%)$  的连续性, 图 3 中的右侧向左下方向的弧线箭头为结果  $P(t\%)$  在相对时间 0%~50% 的变化过程示意, 需要说明的是除 0% 和 50% 时刻外, 结果  $P(t\%)$  并不与  $m+2$  个不同步长  $P(t\%)$  对应的姿势  $P_i(t\%)$  中任意一个相同。第  $i+2$  个单步步长 ( $t\%$  从 50% 变化到 0%) 相对第  $i+1$  个单步步长如果发生变化, 处理过程类似, 参数  $u = (t\% - 50\%) \cdot 2$ , 参看图 3 中的左侧向左上方向的弧线箭头示意。

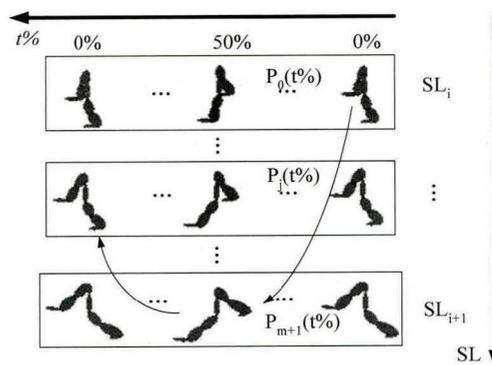


图 3 Bezier 加权姿势生成示意图

### 2.4.2 可控步长腿部连续直线走动运动实时生成算法

算法 1 的收敛速度较快(具体收敛情况见实验结果部分表 3), 能够保证根据给定的单步走动步长  $sl^*$  实时地计算对应  $rv^*$ , 通过 Bezier 加权能实时产生结果  $P(t\%)$ , 结合 2.2 小节的脚地非滑动约束满足方法可以实时生成可控步长的腿部连续直线走动运动  $M(t\%)$ 。算法 2 描述了可控步长腿部连续直线走动运动的实时生成方法。

算法 2 可控步长腿部连续直线走动运动实时生成。

变量符号说明:  $sl\_cur$  表示当前单步步长;  $sl\_next$  表示下一单步步长;  $rv\_cur$  表示  $sl\_cur$  对应的归一化速度;  $rv\_next$  表示  $sl\_next$  对应的归一化速度;  $t$  表示绝对时间;  $t\%$  表示相对时间;  $Llen$  表示腿长;  $Dc$  为双步周期, 本文设定为

常数。假设单步走动步长序列存储在一个队列 Q 中。

```

t = 0.0; //绝对时间初始化
sl_cur = 初始单步走动步长;
WHILE(Q 非空){
    sl_next = Q 的队首元素;
    删除 Q 的队首元素;
    使用算法 1 计算 sl_cur 对应的
rv_cur;
    使用算法 1 计算 sl_next 对应的
rv_next;
    WHILE(单步走动未完成){
        t% = t - floor(t / Dc); //floor( )
表示向下取整
        Bezier 加权计算 t% 对应的姿势
P(t); //2.4.1 小节
        满足脚地非滑动的 T(t) 生成; //见
2.2 小节
        t = t + Δt; //向前推进一个时
间步长 Δt
    }
    sl_cur = sl_next;
}

```

### 3 实验结果及比较

本文提出的方法在 Microsoft Visual Studio 2010 集成开发环境下实现, 走动运动的绘制使用 OpenGL 图形库完成。硬件配置环境: 内存为 2G、CPU 为 Core 双核 1.0 Ghz。各个实验参数设定见表 2。

表 2 实验参数设定

参数	值
$\varepsilon_{\text{fpg}}$	0.004
$\varepsilon_{\text{sl-thr}}$	0.01
Dc	1.346
公式(11)中的 k	0.0015·LLen
仿真时间步长 $\Delta t$	1/60 s
腿长 LLen	1.0

其中 Dc 由 RV 为 1.0 时根据 Boulic 基本模型计算

得到,  $\varepsilon_{\text{fpg}}$ ,  $\varepsilon_{\text{sl-thr}}$ , LLen, k 与具体腿部的骨骼结构参数相关, 可以按比例调节。

表 3 算法 1 的收敛情况

给定步长 SL	对应的 RV	算法 1 迭代次数
0.05	0.03	3
0.10	0.061	2
0.15	0.091	3
0.20	0.1213	1
0.25	0.1591	5
0.30	0.1895	5
0.35	0.2273	4
0.40	0.2577	4
0.45	0.2878	4
0.50	0.3183	4
0.55	0.3486	4
0.60	0.3789	2
0.65	0.4244	3
0.70	0.4547	6
0.75	0.4812	3

本文选取 SL 在 [0.05, 0.75] 范围内均匀分布的 15 个值进行了实验, 对应的 RV、算法 1 的迭代次数见表 3。实验结果表明, 对选定的 SL, 算法 1 最大迭代次数为 6、最小为 1, 最小步长为腿长的 3%, 最大步长为腿长的 75%, 该范围对人类正常情况下的走动步长覆盖情况良好, 并且可以对步长进行连续的选择。

走动运动生成结果: (1) 使用给定的 15 个不同单步步长  $sl^*$  模拟一个连续跨沟直线走动实例, 实时计算对应  $rv^*$  并实时生成走动运动, 结果截图见图 4。Bezier 加权的保边界特性使得中间步长走动运动的引入仅影响  $t\% = 0\%$  和  $t\% = 50\%$  外的双腿姿势, 从而能生成更多的走动结果, 进而为动画制作提供灵活性。(2) 给定右腿步长 0.5、左腿步长 0.0, 实时生成连续右腿走动, 在步长为 0 的姿势附近存在脚部“抖动现象”。(3) 给定右腿步长 0.4, 左腿步长 0.34, 实时生成左右腿不等步长的走动运动, 该结果表明, 能够通过引入随机的小幅度步长扰动克服生成的走动运动周期性单调重复的缺点。如需以上 3 个实验结果视频, 请联系作者。

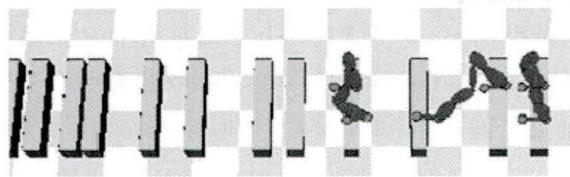


图 4 连续跨沟走动结果截图

与本文研究目的非常相近的文献[14]在 SIMBicon<sup>[5]</sup>物理仿真模型基础上, 通过迭代调整优化模型参数并执行仿真过程进行步长控制, 通过离线仿真获取 1 000 个不同步长走动样本参数用于步长规划参考, 在线仿真在落脚点位置上的平均误差为 4.3 cm, 与本文的最小步长相当。在解决走动规划方面, 文献[15]采用数据驱动的方法, 通过机器学习得到步长与运动数据之间对应关系的先验概率模型, 能够在给定走动距离条件下, 以相同的步长完成给定距离的走动规划, 其完成 9 秒 270 帧的走动数据合成用时 17 min。相比较, 本文不需要任何运动捕捉数据, 也不需要计算代价较大的物理仿真。在落脚点位置误差方面也远小于文献[14]的方法, 并且能够实时在线完成给定步长序列或走动距离条件下, 不同步长连续走动运动的规划与生成。

## 4 结论

本文基于 Boulic 走动运动描述模型, 提出一种实时可控步长的人体腿部连续直线走动运动生成方法, 该方法能够更好适应由于虚拟环境变化从而导致走动步长与步数变化条件下的人体动画制作。在直线行走条件下, 解决了可控步长双腿连续走动的实时生成。连续可控单步走动步长具备在给定直线走动距离条件下的步数与步长实时规划能力。通过设置随机的小幅步长扰动, 能够克服生成的走动运动单调重复的问题。走动过程中上身的运动不需要考虑严格的位置约束因素, 从满足约束性、连续性和协调性的腿部连续走动运动扩展到全身运动相对简单。实时生成的连续变步长走动数据对仿人机器人的运动规划具有参

考价值。

本文提出方法的局限性: (1)在本文提出的方法中, 步长周期  $Dc$  为常数, 暂时不具备调节单步持续时间的能力; (2)不具备生成转弯走动运动的能力; (3)步长过小时, 生成的走动运动存在“抖动”现象, 作者可以提供对应的实验结果视频; (4)更大的步长需要调整 Boulic 基本模型中各个关节转角范围以及与 RV 之间的函数关系。这些局限性的克服以及方法进一步的完善是我们未来的研究内容。

## 参考文献:

- [1] Srinivasan Manoj, Ruina Andy. Computer Optimization of a Minimal Biped Model Discovers Walking and Running [J]. *Nature* (S0028-0836), 2006, 439(7072): 72-75.
- [2] 李石磊, 梁加红, 吴冰, 等. 虚拟人运动生成与控制技术综述 [J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(9): 1758-1771. (Li Shilei, Liang Jiahong, Wu Bing, et al. Survey of Virtual Character Motion Generation and Control [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2011, 23(9): 1758-1771.)
- [3] Van Welbergen Herwin, Van Basten Ben J H, Egges Arjan, et al. Real Time Animation of Virtual Humans: A Trade-off Between Naturalness and Control [J]. *Computer Graphics forum* (S1467-8659), 2010, 29(8): 2530-2554.
- [4] Wikipedia. Rotoscoping. [EB/OL]. (2013-11-22) [2014-04-27]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Rotoscoping>
- [5] Yin Kang-Kang, Loken Kevin, Van de Panne Michiel. Simbicon: Simple Biped Locomotion Control [J]. *ACM Transactions on Graphics* (S0730-0301), 2007, 26(3): Article 105.
- [6] Bolic Rouan, Magnenat Thalmann Nadia, Thalmann Daniel. A Global Human Walking Model with Real-time Kinematic Personification [J]. *The Visual Computer* (S0178-2789), 1990, 6(6): 344-358.
- [7] 刘更代, 潘志庚, 程熙, 等. 人体运动合成中的机器学习技术综述 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(9): 1619-1627.
- [8] Pejsa T, Pandzic I S. State of the Art in Example-based Motion Synthesis for Virtual Characters in Interactive Applications [J]. *Computer Graphics forum* (S1467-8659), 2010, 29(1): 202-226.
- [9] 夏时洪, 魏毅, 王兆其. 人体运动仿真综述 [J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(8): 1354-1361.
- [10] Geijtenbeek Thomas, Pronost Nicolas. Interactive Character Animation Using Simulated Physics: A

State-of-the-Art Review [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2012, 31(8): 2492-2515.

[11] Reitsma P S A, Pollard N S. Evaluating Motion Graphs for Character Animation [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2007, 26(4): Article 18.

[12] Ren Cheng, Zhao Liming, Safonova Alla. Human Motion Synthesis with Optimization-based Graphs [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2010, 29(2): 545-554.

[13] Wei Xiaolin, Min Jianyuan, Chai Jinxiang. Physically Valid Statistical Models for Human Motion Generation [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2011, 30(3): Article 19.

[14] Coros Stelian, Beaudoin Philippe, Yin Kang-Kang, et al. Synthesis of Constrained Walking Skills [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2008, 27(5): Article 113.

[15] Wang Jack M, Fleet David J, Hertzmann Aaron. Optimizing Walking Controllers [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2009, 28(5): Article 168.

附录 A

Boulic 走动模型中关节旋转角度随时间变化的描述

一个走动周期内的时间用 0%~100%的相对时间  $t\%$  表示, 对于任何关节, 选取走动周期内关节旋转角度的极值点为关键点, 每个关键点由相对时间和关节旋转角度 2 个坐标分量描述, 相对时间相邻的关键点之间的旋转角度通过 Hermit 插值得到。髋关节用 3 个关键点描述, 见附图 1, 给定任何 2 个相邻的关键点(例如图 1 中的“1”点和“2”点), 其中一个为起点(“1”点), 另一个为终点(“2”点), Hermit 插值公式为  $\theta(s) = \theta_s \cdot (2s^3 - 3s^2 + 1) + \theta_e \cdot (-2s^3 + 3s^2)$  其中  $\theta_s$  为起点处的角度值,  $\theta_e$  为终点处的角度值,  $s$  的取值为相对时间  $t\%$  在起点对应的相对时间(假设为  $t\%_s$ )和终点对应的相对时间(假设为  $t\%_e$ )之间的相对位置, 即  $s = (t\% - t\%_s) / (t\%_e - t\%_s)$ 。

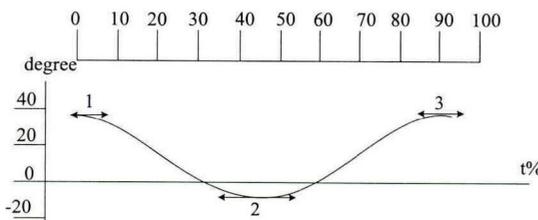


图 1 髋关节旋转角度随时间变化关系

关键点的 2 个坐标值随归一化走动速度 RV 变化而变

化, 将 RV 分 A, B, C 3 个区间: A 区间为[0.0, 0.5]、B 区间为[0.5, 1.3]、C 区间为[1.3, 3.0], 采用分段函数描述关键点的 2 个坐标值, 即关键点的相对时间  $t\%$  和旋转角度 degree 随 RV 的变化关系。图 2 中的左图描述的是髋关节 3 个关键点的  $t\%$  坐标随 RV 的变化关系, 右图描述关键点的 degree 坐标随 RV 的变化关系, 膝关节 4 个关键点和踝关节 5 个关键点的  $t\%$ -RV、degree-RV 的关系参考文献[6]。

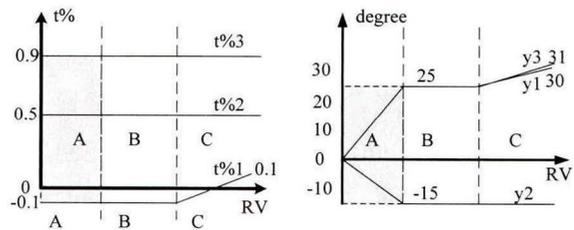


图 2 髋关节 3 个关键点对应的 2 个坐标值与 RV 之间的关系

附录 B

RV 在[0.0, 0.5]范围内变化时, SL 随 RV 变化的单调递增性质证明:

证明

由公式(12)知:

$$SL = f(RV) = LH \cdot [\sin(565 / 27 \cdot RV) + \sin(30 \cdot RV)] + LL \cdot [\sin(790 / 49 \cdot RV - 825 / 343) + \sin(565 / 27 \cdot RV + 3)];$$

将  $f(RV)$  对 RV 求导得:

$$f'(RV) = LH \cdot [\cos(565 / 27 \cdot RV) \cdot 565 / 27 + \cos(30 \cdot RV) \cdot 30] + LL \cdot [\cos(790 / 49 \cdot RV - 825 / 343) \cdot 790 / 49 + \cos(565 / 27 \cdot RV + 3) \cdot 565 / 27];$$

当 RV 在[0.0, 0.5]范围内变化时, 有  $f'(RV)$  表达式中的各个余弦表达式分量:

$$\begin{aligned} \cos(565 / 27 \cdot RV) &> 0; \\ \cos(30 \cdot RV) &> 0; \\ \cos(790 / 49 \cdot RV - 825 / 343) &> 0; \\ \cos(565 / 27 \cdot RV + 3) &> 0; \end{aligned}$$

其他乘积的因子均为正值;

故:  $f'(RV)$  恒为正值;

所以: RV 在[0.0, 0.5]范围内变化时, SL 随 RV 的变化单调递增。

证毕。