

意外受扰虚拟人行为动画关键技术研究

张思卿^{1,3}, 巨筱¹, 谭同德^{1,2}

(1. 郑州科技学院 信息工程学院, 郑州 450064; 2. 郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001;
3. 郑州市机电智能化重点实验室 机器人与微系统创新实验室, 郑州 450064)

摘要:以突发事件下意外受扰的虚拟人为研究对象,结合心理学、生物力学、机器人学、人类行为学等相关领域对人体受扰时反应行为研究的最新进展,提出了一种虚拟人运动中受扰的平衡保持与恢复的动画合成技术,该技术能快速检测虚拟人在运动中的平衡状态,并在虚拟人有摔倒倾向时驱动虚拟人采取自主的保护动作以减少倒地对身体造成的伤害;实验结果表明,在意外情况下虚拟人对不同的外界作用力做出了较为真实的反应。

关键词:虚拟人;平衡保持;行为;动画

Research on Key Technology of Virtual Human Animation of Unexpected Disturbing Behavior

Zhang Siqing^{1,3}, Ju Xiao¹, Tan Tongde^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou College of Science & Technology, Zhengzhou 450064, China;
2. Information Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Mechanical and Electronic Intelligent Key Laboratory, Innovation Laboratory of Robot and Micro System, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: Virtual human as research object to emergency accident disturbed, combined with psychology, biomechanics, robotics, human behavior and other related fields of the latest progress in the reaction behavior of human disturbance, presented by the animation and recovery of synthesis technology disturbance maintains the balance of a virtual human motion, this technique can balance rapid detection of virtual human in motion, and in the virtual people fall tendency of virtual human action to protect their own in order to reduce the ground on the body caused by injury. The experimental results show that, In the virtual person accident case made more real reaction to the external forces of different.

Keywords: virtual human; balance keep; behavior; animation

0 引言

维持与恢复平衡是人体的一项重要功能,人的坐、立、行等绝大多数行为动作都以此为基础。但是,人们都不可避免的会遇到意外的障碍物磕绊、外力击打、不明物或声音的惊吓,甚至地震、塌方等突发事件的侵袭。由于这种受扰具有突发性和不确定性等特点,常常会使人处于高度紧张的非正常状态,即心理学所指的应激状态,此状态将对个体正常的心理功能和行为活动产生很大影响,极易使人无法保持身体平衡,进而导致摔倒发生^[1-3]。目前,因摔倒而引起的身体伤害,已经成为威胁人类健康的主要因素之一^[4]。研究显示,在美国有25%的骨折是由摔倒所致,并且这个比例在老年人中已经高出车祸死亡率^[5]。因此,与人体平衡保持及摔倒相关的研究已引起心理学、生物力学、机器人、公共安全、医疗康复、人类行为学等众多领域的广泛关注。

由于意外事件及当时人们的真实行为反应都难以重现,本研究可为以上领域提供直观的反应行为演化过程的动画仿真。

同时,合成逼真、自然的虚拟人平衡保持与摔倒的行为动画对计算机游戏、影视特效等领域也具有重要的应用价值,并一直都是人体动画领域的研究热点^[6]。然而,由于人体是一个主动的运动系统,具有独立的行为意志,使得其失衡后不会像刚体一样直接被地僵硬倒下,所以现实生活中当人体因受到推搡、击打等扰动而失衡时,他们将本能做出反应性动作努力恢复平衡,很多时候并不会真正摔倒。也因为此,以及人体生理构造结构的高度复杂性和人类行为运动的高度灵活性,使得人体的平衡恢复与摔倒的过程非常复杂,很难用一个可计算数学模型程序化地精确描述^[7-8],所以对该过程的动画合成是计算机动画领域中极具挑战性的研究内容。

1 人体骨骼运动建模

1.1 建立虚拟人模型及其运动捕捉数据库

描述虚拟人的运动,最直观的方法就是参照真实人体,首先建立人体骨架的模型,因为人的运动都是由骨架运动驱动的。而我们在游戏、电影中看到的虚拟人都是在骨架上创建网格蒙皮实现的。虚拟骨架一般使用关节模型,也就是说骨架可以看作是由通过关节顺次连接而成的一系列开式运动链构成的一个树型结构。每一层的骨骼或关节的位置是由它的上一层的位置所决定的。例如肩关节的运动不仅会影响到它的上臂的位置,而且会影响到小臂及手的位置^[9]。虚拟骨架,描述虚拟人的运动行为,它包括虚拟人的静态描述以及与虚拟人运动相关的信息。将该模型(如图1所示)看作是由各个部分通过关节

收稿日期:2014-03-07; 修回日期:2014-04-21。

基金项目:河南省科技厅重点科技攻关项目(132102210106);河南省国际科技合作基金项目(104300510058)。

作者简介:张思卿(1978-),男,河南洛阳人,计算机技术专业,工程硕士,讲师,主要从事人工智能与虚拟现实技术方向的研究。

顺次连接而成的一系列开式运动链, 构成一个树的结构, 每一层的骨骼或关节的位置是由它的上一层的位置所决定的。然后可对其进行虚拟骨架的运动学、生物力学方程的建模, 并在此基础上, 通过抽取描述角色个性的参数赋予每个人体角色一定的个性。图 1 人体虚拟骨架模型所示的是一个完整的人体虚拟骨架的关节链结构, 它是由几条关节链结构连接而成的。每个人体关节可以看作是一个旋转或球形的关节, 分别拥有一个或 3 个自由度^[9]。一般采用状态向量表示在世界坐标系中虚拟人当前状态的位姿, 用公式表示为:

$$q = [T, R, \theta_1, \dots, \theta_n]$$

式中, T 和 R 分别表示人体骨架模型中根关节的平移量和旋转量, $\theta_1, \dots, \theta_n$ 则表示其他个关节相对于其上层父亲节点的旋转量。

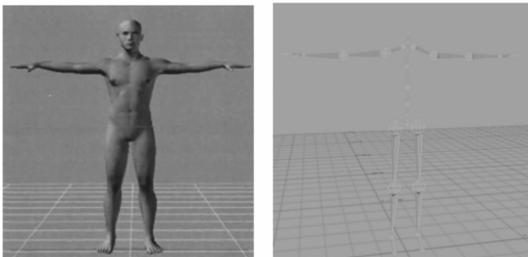


图 1 人体虚拟模型和骨架模型

使用运动数据捕捉设备以三维的形式记录真实的人体运动动作数据, 建立可重用的人体运动数据库。然后计算机根据所记录的数据驱动虚拟人, 并建立具有一定规模的涵盖各种体育运动的运动数据数据库。针对大量的运动捕捉数据, 我们采用自动分割、聚类的方法对这些运动数据进行处理, 在这些运动数据间采样不同的方法构造出合适大小的运动图。

1.2 虚拟人视觉、听觉、触觉的感知建模

1) 视觉建模。采用危险源信息与虚拟人直接关联的方法, 即将危险源信息(如位置、速度等)传送给虚拟人, 并通过在危险源信息中植入能否被感知等状态值设置虚拟人对其的感知权限, 从而实现对人类视觉感知空间局限性的模拟。

2) 听觉建模。先根据真实声场的物理模型建立虚拟声场环境, 然后在虚拟声场中注册声源并定义虚拟人的听觉感知范围, 从而使虚拟人可随时直接查询当前声音事件的相关信息。

3) 触觉建模。主要都是通过行为动画系统的碰撞检测模块实现, 即当虚拟人与其它虚拟对象发生几何穿透时, 感知器就会立即接收到触碰消息。同时, 在碰撞检测过程中, 为了降低计算代价和满足实时性, 虚拟人的肢体和相关虚拟物体将被简化为若干个相连的简单几何体包围盒, 如圆柱体或立方体。

1.3 根据外推质量中心进行快速平衡检测

本文将静止或运动中的虚拟人抽象为如图 2 所示的简化的反向倒立摆模型:

然而, 当虚拟人处于运动状态时, 该判定方法不能准确检测其是否失衡, 因为 CoM 的速度方向将影响 x , 例如若 x 在 BoS 内部而 CoM 的速度方向向外则可能引发失衡; 反之, 若 x 在 BoS 外部而 CoM 的速度方向向内则也可能保持平衡。因此, 虚拟人在行走时的失衡检测中需要考虑 CoM 速度所引起

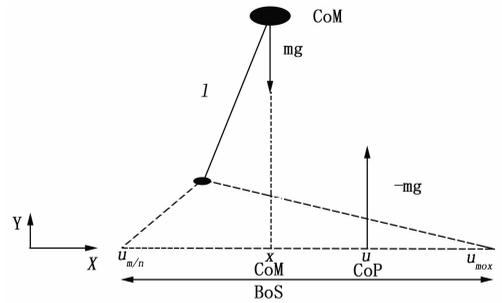


图 2 人体的简化倒立摆模型

的惯性力的影响。为解决以上问题, 我们将采用生物力学领域最近刚刚提出的外推质量中心 (eXtrapolated center of mass, XCoM) 的概念, 建立判定虚拟人静止或运动时的统一平衡判定条件。若记 CoM 的速度为 v_x , 则 XCoM 在地面上的投影位置 ξ 可定义为:

$$\xi = x + \frac{v_x}{\omega_0} \quad (1)$$

公式 (1) 中的 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ 表示倒立摆的特征频率。至此, 根据 XCoM 与 CoP 的相对位置我们就可直接判定虚拟人是否失衡, 而不管其是静止或运动: 当 $\text{CoM} < \text{XCoM} < \text{CoP} < \text{BoS}$ 时虚拟人处于平衡状态, 当 $\text{CoM} < \text{CoP} < \text{XCoM} < \text{BoS}$ 或当 $\text{CoM} < \text{CoP} < \text{BoS} < \text{XCoM}$ 时虚拟人处于失衡状态。

1.4 基于示范学习的反应式行为选择模型

本部分主要将以示范学习 (Learning from Demonstrations, LfD) 技术为基础, 但为了融入虚拟人高层心理及情绪状态对行为选择的影响, 我们在采集示范数据时还为示范者戴上心率传感器等设备记录可以实时反映其心理与情绪状态的生理应激数据, 具体流程如图 3 所示。

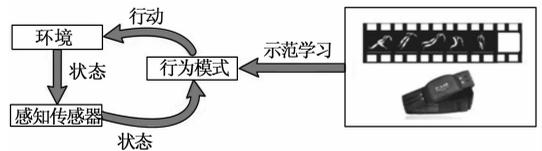


图 3 考虑高层的心理及情绪状态的示范学习方法

在图 3 中, 我们为虚拟人编写一个名为“感知器”的程序插件, 用以不断地监测虚拟环境的变化, 用以模拟人类的多通道信息感知能力和对感知数据的解释能力。感知器将感知的环境信息封装为状态向量, 记为:

$$s_t = s(t) = (\varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)) \quad (2)$$

其中: 式 (2) 中的 $s(t) \in^m$ 表示 t 时刻感知信息快照的 m 维实值向量; $\varphi_j(t), 1 \leq j \leq m$, 表示 $s(t)$ 中第 j 维特征属性在 t 时刻的值。

心理学上的研究指出, 人突然受到外界扰动的刺激时, 其心率将会发生显著的变化, 而心率又是实时反映人情绪的一个重要生理信号, 因此我们将示范者在 t 时刻的心率值也编码进 $s(t)$ 向量中。在示范学习技术中, 我们将虚拟人高层的心理及情绪状态、所受的扰动和所处的环境上下文状态与其低层具体

的平衡恢复和保护性摔倒动作之间的映射关系定义为行为模型 (Behavioral Model), 并记为函数 π 。更进一步说, 对虚拟人的任意给定状态 s_t , 行为模型 π 用于为其自动选取一个合适的反应式行为 a_t , 即:

$$\pi(s_t) = a_t \quad (3)$$

式 (3) 中, $a_t \in^n$ 表示虚拟人行行为空间中的一个 n 维实值向量, 并定义为:

$$a_t = a(t) = (\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)) \quad (4)$$

式 (4) 中, $\theta_i(t), 1 \leq i \leq n$, 表示 $s(t)$ 中第 i 维特征属性在 t 时刻的值。

我们需要对示范者示范过程中的行为采样以“状态 \rightarrow 行为”的形式保存为示范用例库 $D = \{(s_t, a_t)\}$ 。显然, 我们可以认为 D 是对人类行为模型 π 的离散化描述。由于示范者的反应延迟、操作错误以及人类行为的非确定性, 使得采集的行为用例不可避免地存在可引起行为抖动 (很突兀的不自然行为) 的数据噪音, 因此我们首先需要消除数据噪音, 以确保行为用例中相似的状态能够被正确映射到相似的行动, 从而可避免用例间的二义性, 即消除噪音后使得任意 $(s_t, a_t), (s'_t, a'_t) \in D$, 都有:

$$\|s_t - s'_t\| \leq \gamma \Rightarrow \|a_t - a'_t\| \leq \delta \quad (5)$$

其中: 公式 (5) 中 γ 和 δ 分别表示一个较小的标量阈值。

记去噪后的用例库为 D' , 去噪后离散的状态空间为 $S' = \{s | (s, a) \in D'\}$ 。然后, 通过对 D' 的每个离散状态向量采用连续 k 最近邻 (Continuous K Nearest Neighbor) 插值我们可以求取连续状态空间下的行为模型。

2 动画合成关键技术

2.1 动画合成流程

本部分主要将采用动力学模拟与数据驱动相结合的混合控制方法合成虚拟人受扰后的平衡恢复动作, 如图 4 所示。在图 4 中, 虚拟人意外受扰后平衡恢复的动画合成流程如下。

1) 初始时虚拟人由一段行走运动的数据片段 (如 MOTION-TIME 图中的黑色曲线部分所示) 驱动其在平衡状态下正常的行走 (Walking)。

2) 当虚拟人感知到外界突然施加的接触力后, 它的动量立即发生改变同时进入“反应” (Reaction) 状态, 然后自动检测身体是否失衡, 若仍然处于平衡中, 转 Step 1; 否则, 将进入动力学“模拟” (Simulation) 状态, 转 Step 3。

3) 生物力学的研究表明, 人在失去平衡后的 150~250 ms 内不能产生主动的反应行为, 在这段时间内人体只能被动的执行摔倒动作。因此, 为了连贯地合成虚拟人的反应式行为动画, “模拟”状态同时启动两个并行执行线程, 称为模拟线程和搜索线程:

(1) 模拟线程采用动力学方法计算虚拟人失衡时的反应式动作, 并分为被动模拟 (Passive Simulation) 和主动模拟 (Active Simulation) 两个阶段。在被动模拟阶段, 我们将采用基于动力学的“布娃娃”算法模拟虚拟人短暂的摔倒过程。

(2) 与此同时, 搜索线程首先采用行为模型 $\pi(s_t)$ 预测反应运动的策略类型, 如跨步、抓扶或摇摆等, 该过程可实时完成。搜索线程一旦获知策略类型就将该信息传递给模拟线程, 而模拟线程接收到策略类型信息后, 则立即结束被动模拟, 并

开始启动主动模拟阶段, 即采用动力学方法模拟该类型的主动反应式平衡恢复行为。

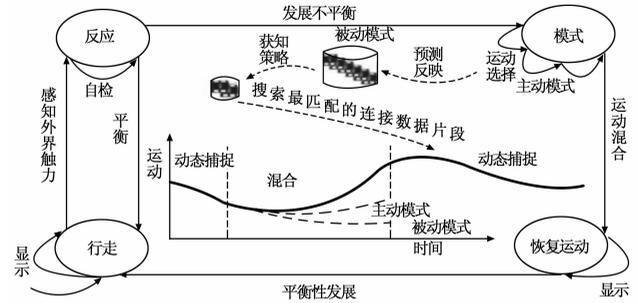


图 4 动力学模拟与数据驱动相结合的混合控制方法

(3) 在反应式行为模拟的过程中, 搜索线程开始对所预测的策略类型的运动数据库进行搜索, 直至搜索到可与当前主动模拟的虚拟人运动姿态最匹配的连接数据片段 (如 MOTION-TIME 图中的蓝色曲线部分所示)。

(4) 系统结束模拟状态, 开始将该运动片段与主动模拟的运动轨迹进行运动混合的插值处理。运动混合过程也是实时完成, 实现了虚拟人运动从主动模拟到运动片段的光滑过渡 (如 MOTION-TIME 图中的红色曲线部分所示), 然后系统进入数据驱动的反应式平衡恢复运动 (Rebalance) 状态, 直至重新获得平衡, 转 1)。

2.2 动画合成关键技术

1) 实现虚拟人对意外扰动刺激的实时、精确、多通道感知能力, 即如何模拟真实人类通过视觉、听觉、触觉等多通道感知, 对发生扰动时的环境场景上下文信息进行识别、获取、解释和记忆, 这为虚拟人是否执行平衡保持或保护性摔倒行为的依据。

2) 建立准确、计算简便的, 可对虚拟人静止和运动状态进行统一处理的平衡判定条件, 用于检测虚拟人受扰动后是否处于失衡状态, 这是虚拟人是否正确执行平衡保持或保护性摔倒行为的前提。

3) 建立虚拟人高层的心理及情绪状态、所受的扰动和所处的环境上下文与其低层具体的平衡恢复或保护性摔倒动作之间的映射模型, 即如何直接通过高层语义控制虚拟人的低层应激反应行为, 这是增强虚拟人行为动画的真实感与智能性的关键。

4) 设计实现方便、灵活通用、计算代价较小、鲁棒性较强的反应式行为控制器, 这是实现符合人类受扰失衡后自然、真实行为特征的关键。

3 虚拟人动画合成的实现

通过对虚拟人运动建模, 对虚拟人在意外情况下受扰的情形, 设计了具有人体特性的自主保护动作控制器, 能根据运动中虚拟人的平衡状态驱动虚拟人完成抓扶、跨步、蹲伏、手撑等动作以减少倒地造成的伤害。我们构建了一个虚拟人运动合成图形化界面, 进行实验结果的演示, 该图形化用户交互界面能够加载不同的人物骨骼模型, 合成连续的运动序列、单个的复杂运动序列以及意外受扰情况下运动序列。

我们设计了一系列实验检测意外受扰情况下人体动画的真

实感、时间消耗以及健壮性。我们采用的算法与 Zordan 等人在 2005 年设计的动态反应方法进行比较可以看出,本文算法在运动生成的速度上有了相当大的提高,同时由于集成了运动中平衡判断、平衡恢复以及保护性的动作,因而在视觉上更具真实感。

系统运行硬件环境为 Intel 酷睿 i5 3230M CPU、4G 内存和 NVIDIA GeForce GT 650M+Intel GMA HD 4000 显卡。虚拟人的身体由互联网下载得到,头部由软件生成。系统根据场景生成脚本,然后进行离线渲染。动力学控制器驱动虚拟人完成平衡和保护动作,模拟的时间步长为 0.005 s,而显示的时间步长为 0.040 s。运动数据库中包含了 191 个运动捕获数据序列,其中大部分都是从不同的方向用不同姿势站立起来的运动,用于衔接摔倒在地后的动作,数据库共大约 2 万帧^[10]。

在系统运行前,用 600 个训练样本对支持向量机进行训练,并使用虚拟人身体部位人体质量中心的位移、速度、头、胸、根关节、下脊椎等关节的属性作为支持向量机的输入。在训练后,最终的预测准确度可达到 96%。实验改变了接触力而不重新训练支持向量机,预测的准确度主要集中在 90%~96% 之间。

人体意外受扰动画实验的例子如图 5~6 所示,其中图 5 显示了虚拟人被另一个虚拟人击打后对于接触力的响应而采取的保护动作,图 6 显示了虚拟人对连续且不可预料的作用力(意外作用力)进行响应的保护动作。从图 5~6 中可以看到,虚拟人的平衡保持、保护和恢复的动作表现都比较真实。

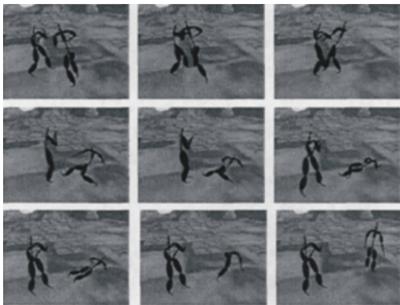


图 5 两个虚拟人参与的主动式保护反应动画

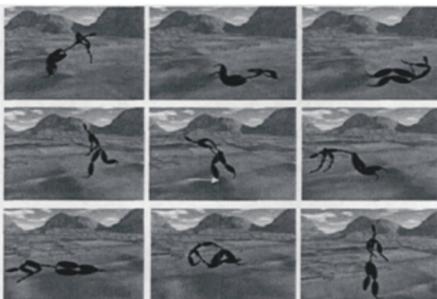


图 6 运动中的虚拟人连续的外作用力采取的保护动作

通过实验总结了人体在意外受扰情况下,发现抓扶周围物体,摆动踝关节、保护性的跨步都是常见的平衡恢复动作,而用手支撑地面、蹲伏动作、保护性的跨步则是有效降低摔倒给人体造成伤害的有效方法。

4 结语

本文以突发事件下意外受扰的虚拟人为研究对象,着重研究虚拟人在应激状态下的平衡保持与摔倒行为的控制机制及演化过程的动画仿真,探索现有工作中尚未涉及的科学难点和有关问题的解决方法,为今后相关的研究与应用领域提供了理论与技术支持。研究的创新点主要有以下几个方面:

1) 建立了视觉、听觉和触觉的感知模型和行为模型。采用视线和声场的物理原理、运动学分析方法建立感知模型,采用运动学和生物力学建立行为模型;使用并行信息传递建立两模型之间的联系。

2) 失衡过程中三阶段的平衡保持行为动画的合成技术。视觉、听觉受突发刺激时,虚拟人主动避险中的平衡保持行为和动画合成技术;虚拟人受突发外力作用失衡后的动画合成技术;虚拟人平衡恢复失败后所采取的保护性摔倒行为的动画合成技术。

3) 建立了灵活通用、计算代价较小、强壮的反应式行为控制器。使用运动学和生物力学方程推出判定虚拟人静止或运动时的统一平衡判定条件,以统一平衡判定条件为基础建立反应式行为控制器。

参考文献:

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, 407 (6803): 487-490.
- [2] Schiff W. Perception of impending collision: A study of visually directed avoidant behavior. Psychological Monographs: General & Applied [M]. 1965.
- [3] Yeomans J S, et al. Tactile, acoustic and vestibular systems sum to elicit the startle reflex [J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2002, 26 (1): 1-11.
- [4] Kemmlert K, Lundholm L. Slips, trips and falls in different work groups with reference to age [J]. Safety Science, 1998, 28 (1): 59-75.
- [5] DeGoede K J, Ashton-Miller, and A. Schultz, Fall-related upper body injuries in the older adult: a review of the biomechanical issues [J]. Journal of biomechanics, 2003, 36 (7): 1043-1053.
- [6] Xu M, et al., L4RW: Laziness-based Realistic Real-time Responsive Rebalance in Walking [J]. computer Graphics Forum, 2010, 29 (7): 2187-2196.
- [7] Qu X, Nussbaum M. Evaluation of the roles of passive and active control of balance using a balance control model [J]. Journal of biomechanics, 2009, 42 (12): 1850-1855.
- [8] Ye Y, Liu CK. Optimal feedback control for character animation using an abstract model [A]. ACM SIGGRAPH [C]. 2010.
- [9] 刘更代. 人体动画合成及其风格化处理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [10] 程 熙. 交互式虚拟人运动生成与控制算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.