

虚拟人运动建模中的逆向运动学方法研究

马建晓¹, 贺毅辉¹, 夏 凯², 王明杰³

(1. 解放军理工大学 指挥自动化学院, 江苏 南京 210007;

2. 96301 部队通信处, 湖南 怀化 418008;

3. 南京军区通信网络技术管理中心, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对当前虚拟人运动建模中缺少环境约束这一问题,文中提出了一种基于环境约束的逆向运动学求解方法。主要研究了在环境约束下,如何运用逆向运动学方法使人体的步行运动更加真实直观。首先提出了人体的层次结构模型和关节模型,其次对 CCD 算法的实现方法进行分析,最后结合 CCD 算法提出一种在环境约束下调整人体步行运动的方法。解决了运动捕捉方法中动作单一的问题,使虚拟人能够根据环境信息调整现有的动作,最终能够使虚拟人在平坦地面的运动和上下台阶运动都更加灵活真实。

关键词:虚拟人;逆向运动学;CCD 算法;步行运动

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)09-0088-04

Research on Inverse Kinematic in Modelling of Virtual Moving Human

MA Jian-xiao¹, HE Yi-hui¹, XIA Kai², WANG Ming-jie³

(1. Institute of Command Automation, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China;

2. Communication Section of 96301 Troop, Huaihua 418008, China;

3. Administration Center of Communication and Network in Nanjing Theater, Nanjing 210016, China)

Abstract: To solve the problem of lack of environment constrains in model-building of virtual human, a solution method of IK that based on environment constrains was newly proposed. Mainly probed how to use inverse kinematics method to make the walking motion of virtual human more intuitionistic with environment constrains. Primarily, investigate the multi-layered model and joint model. And then, the procedure of CCD algorithm was analyzed. Finally, proposed an idea of adjusting human walking motion that based on environment constrains with CCD algorithm, so that the problem of motion singleness is solved. The motion of virtual human on even ground and stair could be more flexible.

Key words: virtual human; inverse kinematic; CCD algorithm; walking motion

0 引 言

虚拟人(Virtual Human)是完全由计算机生成的,看起来像真人的图形实体,是人在虚拟环境中的几何特性与行为特性的表示。近年来在机械工程、动画、空间探索和军事训练等虚拟环境中,对虚拟人运动行为的仿真及其性能效果的评估变得越来越重要^[1]。在虚拟人的各项研究中,运动控制研究是其中的一个重要方面。

目前,常用的虚拟人运动建模方法有关键帧方法^[2]、运动学方法^[3]、动力学方法^[4]和运动捕捉方

法^[5]。关键帧方法虽然简单直观,但是由于三维人体运动极其复杂,一般都有几十个自由度,要绘制出每个关键帧姿态下的每个自由度的参数是非常繁琐和困难的^[6]。运动捕捉方法通过捕获现实中人的运动数据来实现虚拟人的运动,能够较真实地复现人的运动。但是运动捕捉方法获得的运动数据只能实现一种特定的运动,不能实现虚拟人丰富的运动姿态。动力学方法通过给出人体各个关节所受的力和力矩来确定三维人体的运动,生成的运动较符合物理规律。但其数据计算困难且交互性差。运动学方法主要分为正向运动学和逆向运动学^[7]。逆向运动学方法通过给定虚拟人运动关节末端效应器的位置来反求出其它关节的运动信息,实现虚拟人的运动。逆向运动学方法在虚拟人运动控制领域有着广泛的应用。

收稿日期:2011-02-19;修回日期:2011-05-26

基金项目:总参重点科研项目(解放军理工大学2010年011号)

作者简介:马建晓(1985-),男,河南汝阳人,硕士研究生,研究方向为虚拟现实、系统仿真。

文中首先分析了虚拟人的运动学模型,然后讨论了现有的一种逆向运动学求解算法—循环坐标下降(Cyclic Coordinate Descent, CCD)算法,并结合此算法提出了一条解决人体步行运动和上下台阶运动的思路,使人体在环境条件约束下,灵活改变和调整运动,做出相对真实的动作。

1 虚拟人运动模型的建立

1.1 人体层次结构模型

从运动角度来分析,人体是由 200 多个关节组成的复杂对象,要模拟真实人的运动,就必须提供所有关节的运动数据。从生理解剖的角度来分析,大致可以从骨架、肌肉和皮肤三层分别进行模型构造^[8,9]。由于运动控制和骨架层模型紧密相连,文中主要对骨架层次上的建模进行研究。

针对人体结构的复杂性问题,在建模时结合实际情况,对人体进行抽象和简化。把人体结构抽象成一个树形分层结构。并对一些复杂的关节结构进行简化,比如肩关节,它实际由很多关节组成,但在建模时把它当作一个类似铰链的关节,指骨和腕关节也做类似的简化处理。虚拟人模型中各个肢体之间存在一定的运动连带关系,将关节看成结点,关节之间的骨骼看成链,这样就可以建立人体的树形分层结构,如图 1 所示。一共定义了 15 个关节,根关节是髋关节,它是面向世界坐标系的,其它关节都是面向其父关节的。图 2 给出了人体骨架模型结构图。人体的运动可以简化

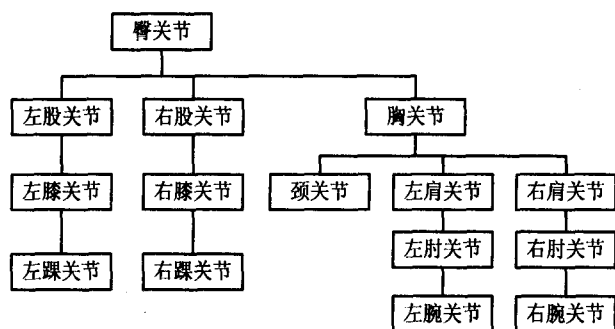


图1 虚拟人模型的运动层次结构

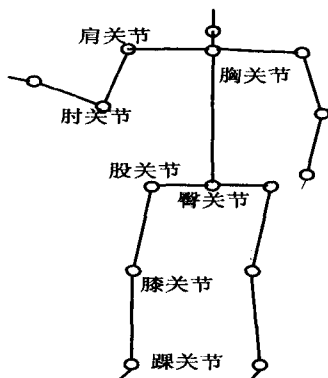


图2 人体骨架结构图

成根关节的平移运动和其它关节的旋转运动。

1.2 关节模型

关节连接着人体各个运动部位,是人体运动的枢纽和使人体能够正常运动的重要器官。在人体建模中,关节一般被模拟为球铰。但人体关节实际活动范围受到人体运动生理上的限制,并没有球铰链那样的自由度。因此在构建关节模型时必须明确人体各关节运动的约束条件。为了描述人体骨架模型中各个关节的相对运动位置和姿态(简称位姿),将每个关节上都固定一个坐标系,即局部坐标系,把自转轴(即向上的骨骼生长方向的轴)定义为Y轴,取关节轴线方向为X轴,然后根据右手法则定义Z轴^[7]。这样就可以用齐次坐标变换矩阵来描述这些坐标系之间的相互关系,即可用一系列矩阵来描述某一关节的位姿。

关节模型可按照自由度的多少分为三大类:

(1) 一个自由度的关节。这类关节只能上下弯曲,没有自转,也不能左右摆动。其中弯曲可以定义为绕X轴的运动。

(2) 两个自由度的关节。这类关节除自转外还有其它两个旋转自由度。其中一个自转自由度,另一个是绕X轴的摆动自由度。

(3) 三个自由度的关节,有自转,又有摆动。这类关节可以用铰链来模拟。

以上所说的关节自转和关节摆动都要遵循一定的约束,在求解的过程中要根据人体的一些生理极限特征给出旋转(摆动)和自转的范围。即:

$$\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$$

其中, θ_{\min} 及 θ_{\max} 分别为关节 i 所允许的最小和最大旋转角度。

每个关节 i 都绑定一个旋转平移矩阵 T_i , 用来表示关节 i 的坐标系与其父关节 $i-1$ 坐标系的变换关系。即关节 i 的坐标系相对于关节 $i-1$ 的坐标变换为 T_i , 以此类推, 关节 i 的坐标系相对于世界坐标系的变换为 $T_0, T_1, \dots, T_{i-1}, T_i$ 。这样人体的运动学求解就转换成关节的求解。 T_i 采用 4×4 矩阵的形式, 其中左上角的 3×3 矩阵代表的是旋转变换参数, i_x, i_y, i_z 代表的是平移变换。可以将 T_i 拆分为两个矩阵的乘积, 分别用 R_i 表示旋转矩阵、 P_i 表示平移矩阵, 则:

$$R_i = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} & 0 \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} & 0 \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, P_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & i_x \\ 0 & 1 & 0 & i_y \\ 0 & 0 & 1 & i_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$T_i = P_i * R_i = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} & i_x \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} & i_y \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} & i_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

在求解逆运动学问题时,由于子关节相对父关节的位置是已知的,因此 P_i 是已知的。所以需要求解的就是矩阵 R_i , 当运动链较长时,直接求解是相当困难的。

2 逆向运动学求解算法的研究

2.1 逆向运动学问题概述

在构建了虚拟人树形分层模型后,关节和骨骼就构成了运动链。利用运动链对运动进行控制主要有两种方法:正向运动学和逆向运动学。正向运动学是指给定运动链上各个关节的旋转角度,求解末端效应器的位置信息^[10]。逆向运动学问题是已知末端效应器的位置,求解使末端效应器到达指定位置而各关节最终需要旋转的角度。

假设一个运动链包括 n 个关节,表示成 $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。末端效应器的位置 $p(x, y, z)$ 。逆向运动学的目标就是根据给定的末端效应器的空间位置 p , 求解对应的 q , 使它满足:

$$q = k^{-1}(p)$$

其中 k 是一个非线性函数,它的定义域是 $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$, 值域是末端效应器的可达空间 $s(x, y, z)$ 。正向运动学表示为:

$$p(x, y, z) = k(q)$$

求解逆向运动学问题的方法大致可以分为数值法和分析法两大类。数值法能处理自由度较多的具有分层结构的逆向运动学链,具有较强的灵活性和通用性。数值法实际上是一种反复逼近、不断迭代的方法。主要可分为雅可比(Jacobian)矩阵算法和循环坐标下降(Cyclic Coordinate Descent, 简称 CCD)算法。分析法对于自由度较少的 IK 链,求解速度较快,可以求得所有的解,但是随着关节数量的增加,分析法求解方程的效率也急剧下降,并且分析法不适合分层结构。文中主要对数值法中的 CCD 算法进行研究。

2.2 CCD 算法的一种实现方法

根据前文构建的人体运动模型可以得知,人体运动是由根关节的平移和其它关节的旋转实现的。因此只要改变运动关节的旋转矩阵,就可以改变运动目标的位置坐标,从而实现在运动的过程中不断对人体模型进行更新。CCD 算法实际上是一种组合优化的反复迭代的启发式方法,它根据模型中末端效应器位置的变化来最优地推导出模型中人体其它节点的旋转角度。CCD 算法根据末端效应器的位置沿着运动链依次改变关节的旋转角度,使得末端效应器逐步逼近目标。该算法在人体关节的生理旋转范围约束内进行迭代运算,所以能够创造出符合人体骨架结构的人体运动模型。

从末端效应器开始,逐步改变每个关节的旋转角度。先是改变最末端关节 J_0 的位置,从关节 J_0 向末端效应器 E 作向量 V_1 , 从关节 J_0 到目标点 D 作向量 V_2 , 求出向量 V_1 和 V_2 的夹角 α 及其旋转轴 VR , 让 J_0 的子链绕旋转轴 VR 转 α 角度,这样末端效应器 E 就到达了一个新位置,如图 3 所示。

然后进行判定,若末端效应器 E 没有到达 D , 继续取 J_0 的父节点 J_1 , 从 J_1 向末端效应器 E 作向量 V_1 , 从关节 J_1 到目标点 D 作向量 V_2 , 再求出向量 V_1 和 V_2 的夹角 β 及其旋转轴 VR' , 让 J_1 的子链绕旋转轴 VR' 转 β 角度,则 E 又到达了一个新位置,如图 4 所示。

若 E 没有到达 D , 则继续取 β 的父节点 J_2 , 按照上述方法改变其旋转角度,直到根节点。若 E 还没有到达 D , 则从末端关节 J_0 开始新的循环。如果达到了限定的循环次数,但是 E 还没有到达 D (或者 E 与 D 之间的距离超出了可允许的误差范围), 则说明需要平移根关节才能使末端效应器到达新位置,此时就需要从根关节做平移向量,移动根关节后再进行循环。例如当人体伸手去拿较近的物体时,只需要肘关节和肩关节的旋转就可以达到,而不需要让髋关节和胸关节参与运动。但对于比较远的物体,当回溯到根关节后,仍不能拿到物体,这时候就需要根关节的平移运动,同时还需要人体下肢运动来配合才能实现拿目标物体的动作。

以上是国外学者 Jeff Lander 实现 CCD 的一种方法^[11]。

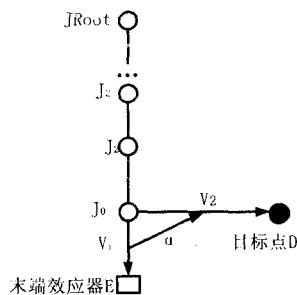


图 3 处理关节 J_0

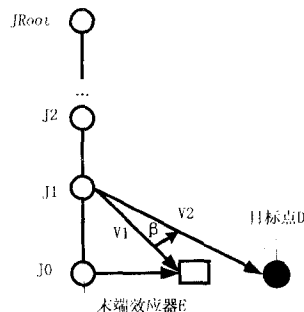


图 4 处理关节 J_1

2.3 结合 CCD 算法实现人体步行运动的一条思路

上节所述的 CCD 实现方法在描述人体上肢运动比如伸手拿物体时,有可能没有解析解,这种情况的出现说明物体在人体的可触及范围以外。而步行运动中一般不会出现这样的问题。步行运动相对于伸手拿物体的运动要简单一些,因为人体在平坦地面的步行运动遵循一定的规律^[12]。而在传统的步行运动研究中所涉及的环境多数是平坦地面,不需要考虑环境对运动的影响。由于步行运动是周期性的运动,因此只要把一个周期内的运动设计好就可以重复实现人体的步行运动。

在用 CCD 算法逆向求解步行运动时,脚掌作为末端效应器,需要求解位姿的关节主要有踝关节、膝关节、股关节以及根关节(此时可以看作人体的重心)。人体的步行运动可看成是由摆动腿踏出实现迈进的单脚支撑期和双脚接地移送重心的双脚支撑期两个差异较大的运动构成。

(1) 在平坦地面上的步行运动。

当虚拟人在平坦地面上行走时,运动是周期性重复的,需要求解的主要是单脚抬起时各个关节的位姿。此时的运动关节主要是膝关节和股关节,因此在运用 CCD 算法进行迭代时,只需处理这两个关节即可,大大减少了计算量。当双脚接地移送重心时,保证双脚落地时重心位于两脚的中间位置即可。

(2) 上下台阶时的运动。

当虚拟人在非平坦地面上行走时,例如上下台阶,此时人体的摆动腿踏出后的落地点是根据台阶的高度而确定的。在处理此类运动时,需要预先设定好人体抬腿高度的极大值以及人体正常步行时的抬腿高度。当人体上台阶时通过碰撞检测确定了台阶的高度后,人体的抬腿高度和落地点也就确定了。如果台阶的高度大于人体抬腿高度的极大值,则认定人体无法上台阶,运动失败。反之,则运用 CCD 算法通过目标点的位置(即迈出脚的落地点)来反求出虚拟人下体其它关节的位姿。

此方法相对运动捕捉法虽然增加了计算量,但是使人体的步行运动更加灵活多样,克服了运动捕捉法只能复现单一运动的缺点。

3 结束语

文中就虚拟人运动建模方法和逆向运动学算法作了初步的探讨,提出了一条基于 CCD 算法实现人体步行运动的思路,使虚拟人能够根据环境约束调整运动行为。但此方法需要实时精确的碰撞检测作为基础,且需要合适的关键帧插值技术来实现完整流畅的虚拟人动画,这些正是下一步要研究和实现的问题。

参考文献:

- [1] 洪炳熔, 贺怀清. 虚拟人的步行和跑步运动控制方法的研究[J]. 高技术通讯, 2001(3): 91-95.
- [2] Terra S C L, Metoyer R A. Performance timing for key-frame animation[C]//Eurographic/ACM Symposium on Computer Animation. [s. l.]: [s. n.], 2004: 253-258.
- [3] Tolani D, Goswami A, Badler N I. Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs[J]. Graphical Models, 2000, 62(5): 353-388.
- [4] Kulpa R, Multon F, Arnaldi B. Morphology-independent representation of motions for interactive human-like animation[J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 343-352.
- [5] Kovar L, Gleicher M, Pighin F. Motion Graphs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 473-482.
- [6] 李淳芃, 王兆其, 夏时洪. 人体运动的函数数据分析与合成[J]. 软件学报, 2009, 6(6): 1664-1672.
- [7] 徐 孟, 孙守迁, 潘云鹤. 虚拟人运动控制技术研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 338-346.
- [8] 李春霞, 杨克俭, 李 波. 人体骨架模型的建立及 IK 问题的一种解决方式[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(6): 815-818.
- [9] 张 鑫, 王章野, 王作省, 等. 人体运动建模的实时逆运动学算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009(6): 853-860.
- [10] Wang L C T, Chen C C. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(4): 489-499.
- [11] Lander J. Making Kine More Flexible[J]. Game Developer, 1998(11): 15-22.
- [12] 王小杨, 杜晓荣, 孙韵琳. 人体跨越障碍物的运动生成方法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(10): 27-31.

(上接第 87 页)

- liability engineering. [s. l.]: [s. n.], 2004: 47-53.
- [7] 于碧媛. 软件可靠性模型及估值的介绍[J]. 导弹与航天运载技术, 1994, 11(3): 55-60.
- [8] Jalote P, Murphy B. Post-release reliability growth in software products[J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), 2008, 17(4): 56-57.
- [9] 刘 云, 赵 玮. 软件可靠性研究与进展[J]. 微机发展

(现更名: 计算机技术与发展), 2003, 13(2): 12-14.

- [10] Belli F, Jedizejowicz P. Fault-Tolerant Program and Their Reliability[J]. IEEE Trans. on Reliab, 1990, 39(2): 184-192.
- [11] 傅佩琛, 付 遥. 软件可靠性的发展状况与展望[J]. 电子科技, 1997, 10(4): 58-59.
- [12] 吕 励. 软件可靠性模型分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1997, 2(1): 45-48.