

人体骨架模型的建立及 IK 问题的一种解决方式*

李春霞 杨克俭 李 波

(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430063)

摘要: 从骨架层次上对人体进行抽象和简化, 并产生了人体分层结构树; 同时讨论了人体的关节模型和关节约束, 把关节分为一个自由度的关节、两个自由度的关节和三个自由度的关节。并在此人体分层结构上, 提出了解决 IK 问题的指向线算法, 这个算法和国外学者提出的 CCD 算法思想不谋而合, 讨论了 CCD 针对解决人体 IK 问题的优势和不足之处, 提出了相应的改进方法

关键词: 骨架建模; 关节模型; 反向运动学; 指向线算法; CCD

中图法分类号: TP391.41

0 引言

图形学和网络技术的迅速发展促进了虚拟现实技术的发展。在虚拟环境中用虚拟人作为参与者的表示, 反映了用户在虚拟世界中的活动, 提高了用户在虚拟世界中的沉浸感。虚拟人是完全由计算机生成的, 看起来像真人的图形实体。它作为 VE 中有特色的群体, 历来受到研究者的格外重视。在动画、机械工程、医学、军事和空间探索等虚拟环境中, 对虚拟人行为的模拟及其性能的评估变得越来越重要, 其应用包括工业环境改造学、军事训练、体育医学、空间任务仿真、虚拟角色设计和机械虚拟造型等。在对虚拟人研究中, 运动控制的研究是其中的一个重要方面^[1]。运动控制的方式有正向运动学、反向运动学、动力学等方式。

文中讨论的是骨架模型的构造, 以及在此模型基础上, 结合指向线算法和 CCD 算法, 进行加工和改进, 实现运动控制的一种方式: 反向运动学方式。

1 人体骨架模型的建立

1.1 人体分层结构

人体是个非常复杂的系统。人体是由 200 多

个旋转关节组成的复杂形体, 要模拟真实的人体运动, 需要提供所有的关节数据。所以人体运动的仿真要远复杂于一般的刚体。对于人体运动的仿真, 首先建立逼真的三维人体模型, 再是要产生人体模型各关节运动的驱动数据。对于人体可以从 3 个层次上进行构造: 骨架、肌肉和皮肤^[1]。由于运动控制和骨架模型紧密相连, 所以这里只讨论骨架层次上的建模。

由于人体结构的复杂性, 有必要对人体进行抽象和简化; 为了更好地描述运动, 把人体构造成层次结构。人体骨架模型主要由关节和骨骼构成。有些关节结构比较复杂, 比如肩关节, 它实际上由很多组织构成, 但这里只把它当作一个类似铰链的关节; 有些关节并不存在, 只是从结构上给它一个名字, 比如肩胸关节。对于骨骼也作了简化, 比如前臂本来是由尺骨和桡骨组成的, 这里把尺骨和桡骨合并为一个骨骼。把骨骼看作不可形变的刚体。

人体模型中各肢体之间存在一定的运动连带关系, 将关节看成点, 将关节之间的骨骼看成是链, 就可以按照运动关系将各肢体链接起来^[1]。人体分层结构其实就是树形结构。每个节点只有一个父亲, 根节点无父亲; 关节的父亲和儿子是骨骼, 每个关节只有一个儿子; 骨骼的父亲和儿子是

* 收稿日期: 2003-08-29

李春霞: 女, 27 岁, 硕士生, 主要研究领域为计算机图形学、虚拟现实及计算机仿真

* 国家自然科学基金项目资助(批准号: 60073057)

关节; 每块骨骼可能有多个子关节, 比如髋骨骼就有左股关节、右股关节和腰关节等 3 个关节; 总共定义了 23 个关节 23 块骨骼; 根骨骼是臀部(hip), 臀部父关节是 JRoot, 是面向世界坐标的, 是树的总根. 人体树的层次结构, 如图 1 所示

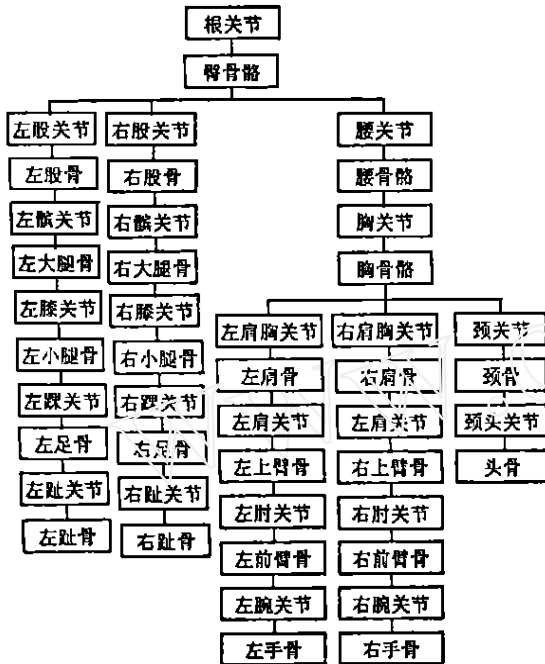


图 1 人体树层次结构图

1.2 关节模型

关节是连结人体各部位的环节, 也是人体运动的枢纽, 是传递力和力矩, 使人体能作正常运动的重要器官. 它结构复杂. 人体关节通常被模拟为球铰, 但人体关节实际活动范围并非有铰链那样的自由度, 它受到人体运动生理上的限制, 所以必须明确人体各关节运动的约束条件^[3]. 把关节转动分为自转(twist)和摆动(swing). 假设沿着骨骼生长方向的是 Y 轴, 也即自转轴 X 轴和 Z 轴是摆动轴. 下面提到的自由度都是指转动自由度

1) 一个自由度的关节(one DOF), 比如手指, 只能上下弯曲, 没有自转, 也没有如图 2 所示^[4].

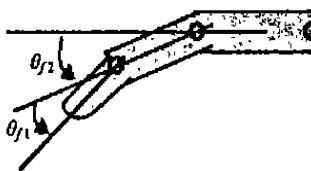


图 2 一个自由度的关节

2) 两个自由度的关节(two DOF), 比如手腕、肘. 手腕的两个自由度是除自转外的其他两个旋转自由度. 肘关节的两个旋转自由度的其中一个自转. 所以两自由度的关节有两种形式

3) 三个自由度的关节(three DOF), 比如肩

关节, 既有自转(twist), 又有摆动(swing). 三个自由度的关节可以用铰链来模拟, 但是转动具有一定的约束

1.3 关节约束

这里的约束只给出生理约束, 有旋转约束(swing limit)和自转约束(twist limit), 给出旋转和自转的范围

2 人体 IK 的一种实现方式

2.1 IK 的概念

IK (inverse kinematics), 是反向运动学的意思. 在人体分层结构中, 关节和骨骼实际构成了运动链, 肩关节、肘关节、腕关节及其子骨骼就是运动链上的一条分支. 利用运动链对运动进行控制. 运动分为正向运动和反向运动. 已知链上各个关节旋转角, 求各关节的位置信息和末端效应器(end effector)的位置信息, 这是正向运动学的问题; 若已知末端效应器的位置信息, 反求其祖先关节的旋转角, 这是逆运动学的问题^[1]. 如图 3



图 3 IK 问题

2.2 求解 IK 的方法

求解 IK 问题的方法有很多, 大致可以分为如下两大类

分析法(analytical solutions) 可以求得所有的解, 对于自由度较少的 IK 链, 求解速度较快, 比如 Korein 提出了一种解决 7 自由度的带有约束的手臂 IK 问题的方法^[4]. 但随着关节数量的增加, 分析法求解方程的复杂度也急剧增加^[5]; 并且分析法不适合分层结构^[4]. 所以分析法只适合自由度比较少的链, 不适合复杂的 IK 链

数值法(numerical solutions) 数值法的优势在于通用性和灵活性, 能处理自由度较多的比较复杂的具有分层结构的 IK 链, 能较容易地加入新的约束条件到 IK 链中^[4]. 实际上是一种反复逼近, 不断迭代的办法. 比如 Newton-Raphson 方法, Whitney 提出的 the resolved motion-rate control 方法, Welman 提出的 Jacobian transpose 方法, 以及各种优化算法等. 由于 IK 问题的复杂

性, 数值法的不足之处在于高计算量, 由于是反复迭代进行求解, 所以所求结果未必准确

2 3 指向线算法及 CCD (cyclic-coordinate descent) 算法

指向线算法是本实验室在人体分层模型基础上提出来的用来解决 IK 问题的一种方法, 它的基本思想是作指向线进行旋转, 逐级释放关节, 不断逼近目标 它的思想和国外学者 Chris Welman 提出的解决复杂 IK 问题的方法 cyclic-coordinate descent (CCD)^[2]不谋而合 CCD 是一种反复迭代地启发式方法^[4], 它沿着运动链依次改变一个关节的旋转角度, 使得 end effector 逐步逼近目标, 实际上就是一种数值法

下面所说的旋转既可理解为关节的转动, 也可理解为骨骼绕其父关节的转动, 或者称为摆动 末端效应器 E 达到目标点 D 是指 E, D 之间的距离小于一个事先给定的足够小的精度

Jeff Lander 实现 CCD 的方法是: 从运动链的末端开始, 逐步改变每个关节的旋转角度 先是改变最末端的关节 J_0 , 从 J_0 到末端效应器 E 作向量 V_1 , 从 J_0 到目标点 D 作向量 V_2 , 求出两个向量的夹角 α 及其旋转轴 V_R , 让 J_0 下的子链绕旋转轴 V_R 转 α 角度, 如图 4 (本例图中无 JTmpRoot 节点), 则末端效应器 E 达到一个新位置, 若 E 没有达到 D , 接着取 J_0 的父节点 J_1 , 同样从 J_1 到 E 作向量 V_1 , 从 J_1 到 D 作向量 V_2 , 求出向量 V_1 和 V_2 的夹角 β 及其旋转轴 V_R , 让 S 下的子链绕旋转轴 V_R 转 β 角度, 如图 5 (本例图中无 JTmpRoot 节点), 则末端效应器 E 又达到一个新位置, 若 E 没有达到 D , 则继续取 J_1 的父节点, 改变其旋转角度, 直到根节点 JRoot 若 E 还没有达到 D , 则又从末端关节 J_0 开始新一轮运动, 直到 E 和 D 之间的距离足够小或者到达了给定的循环次数

由以上描述可以看出, CCD 算法容易控制, 便于在链中加入新的节点, 是简单有效的

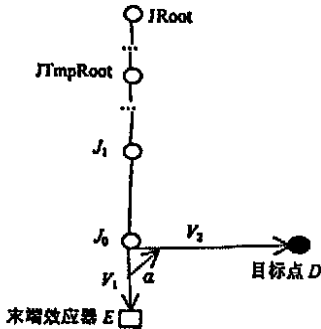


图 4 处理关节 J_0

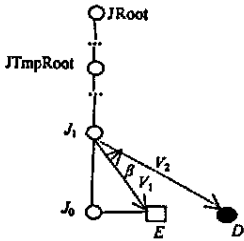


图 5 处理关节 J_1

2 4 改进算法

CCD 描述人体运动的不合适之处: (1) CCD 每一次内循环都最终回溯到根节点, 而人体运动比较复杂, 对于一些比较近的目标, 可能不需要运动到根节点, 通过前端几个关节的旋转就可以达到目标点 比如手去拿一个离得很近的杯子, 可能只需要肩关节、肘关节、腕关节的相应旋转就可以达到, 而不需要让胸、腰、根关节参与运动 对于比较远的目标, 才可能要回溯到根, 甚至使用根的其他分支来配合 比如, 手够一个较远的东西, 可能需要脚来配合; (2) CCD 中骨骼绕其父关节的转动只是摆动, 而骨骼没有自转, 不符合人的生理习惯 人体运动过程中, 很多情况下是骨骼自转在同时发生 比如手的初始状态是手心朝上, 而目标在手背下方, 这时进行 IK 运动时, 在手向目标点的逼近过程中, 同时有肘关节和肩关节的自转, 使手心朝向目标点

针对 CCD 算法的不足之处, 改进算法如下

在描述摆动时, 把骨骼看作一个向量, 在描述自转时, 把骨骼看作一个实体, 这个实体具有一个正方向 为了描述自转, 每个关节都规定一个朝向 O (其实也是定义其子骨骼的正方向), 比如规定腕关节的朝向是垂直手掌朝外的方向 目标点不一定是可以达到的, 在目标点不可达的情况下, 整个运动链只向目标有运动趋势

步骤:

1) 根据一定的策略 (如图 4 所示), 先预测一下运动到哪个关节 JTmpRoot 为止 一个简单的预测办法是计算某一关节 J 到 E 之间所有骨骼的长度之和 Len , 看 Len 是否大于 J 到 D 的长度, 是的话就把 JTmpRoot 定位在 J .

2) 从 J_0 开始, 向末端效应器 E 作向量 V_1 , 向目标点 D 做向量 V_2 , 计算 V_1 和 V_2 的夹角 α 以及从 V_1 旋转到 V_2 的旋转轴 V_R . J_0 进行自转, 在 J_0 的自转范围内, 使朝向 O 尽量指向目标点, 同时 V_1 绕旋转轴 V_R 转向 V_2 , 转动的角度应该在 J_0 的旋转范围内, 若转动到达了 J_0 的极限范围,

则为 J_0 设置一个到达极限的标志

此时 E 转到了一个新位置; 若 E 没有达到 D , 接着取 J_0 关节的上一节关节 J_1 , 重复在 J_0 所做的工作(如图 5 所示); 若 E 没有达到 D , 继续取 J_1 的上一节关节, 直到 JTmpRoot 关节, 重复在 J_0 所做的工作; 若 E 还没达到目标点 D , 则看 JTmpRoot 到 J_0 之间的关节旋转是否都到达了它们的极限范围, 若不是的话, 则又从 J_0 开始重复本过程; 若是的话, 则把 JTmpRoot 定位为 JTmpRoot 的父关节, 再从 J_0 开始重复本过程

根据改进算法所得到的运动结果见图 6, 7, 目标位置相对于根的位置是(0.6, -0.1, 0.3)。

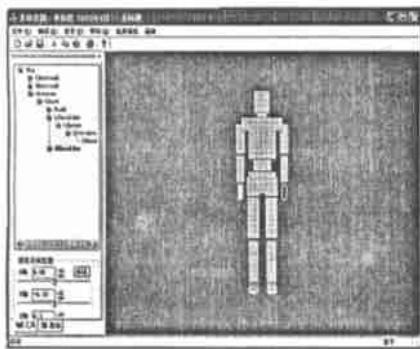


图 6 运动前位置状态(左手被选中)

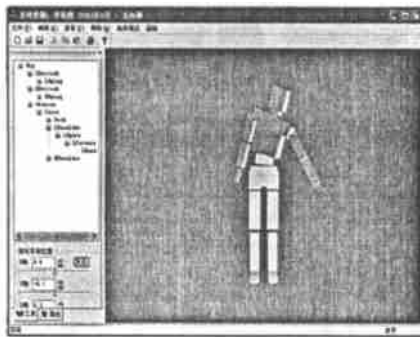


图 7 运动后位置状态(左手被选中)

3 结束语

文中探讨了人体骨骼分层模型的建立, 结合指向线算法和 CCD 算法实现的 IK 的一种解决方法, 但是这种方法仍有许多不足之处: 没有考虑平衡控制, 没有考虑动力学因素, 这是今后要研究的重点

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 高技术通讯, 2001(3): 91~ 95
- 2 Jeff Lander Making kine more flexible. Game Developer, 1998(11): 15~ 22
- 3 忻鼎亮 运动生物力学 上海: 东华大学出版社, 2002 87~ 90
- 4 Boulic Dr R. Inverse kinematics techniques for the interactive posture control of articulated figures PhD Thesis N 2383, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, EPFL, Switzerland, 2001. 30~ 55
- 5 金小刚, 陆国栋 关节动画和人体动画 电脑动画专栏, 1997(1): 40~ 42
- 6 杨克俭, 刘舒燕, 陈定方 分布交互三维视景行为-特征建模方法研究 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(11): 846~ 850
- 7 王玉华, 杨克俭, 曾梅兰 面向对象技术在三维虚拟场景建模中的应用研究 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(1): 37~ 39

A Modeling of Human Skeleton and A Method of Solving IK Problem

Li Chunxia Yang Kejian Li Bo

(School of Computer Science & Technology, WUT, Wuhan 430063)

Abstract

This paper discusses hierarchical structure of human body model through abstracting and simplifying human body in aspect of skeleton, and discusses the joint models and joint limits. Joint model are classfied to one DOF, two DOF, three DOF. Then based on the articulated body model it puts forward a method of solving IK problem called pointing-line which is similar to a method called CCD put forward by a foreign scholar, and then discusses its advantages and drawbacks to the human model IK problem, and finally gives an improving method.

Key words: skeleton modeling; joint model; inverse kinametics (IK); pointing-line; CCD