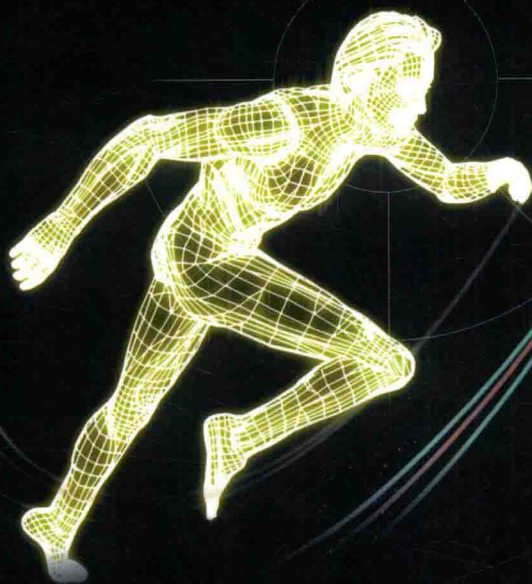


Key Algorithms in Human
Motion Processing and Motion Synthesis

人体运动数据处理及 合成中的关键算法

王鹏杰 吕培◎著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Key Algorithms in Human
Motion Processing and Motion Synthesis

人体运动数据处理及 合成中的关键算法

王鹏杰 吕培◎著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

人体运动数据处理及合成中的关键算法 / 王鹏杰,
吕培著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017.8
ISBN 978-7-115-45936-7

I. ①人… II. ①王… ②吕… III. ①人体运动—数
据处理—算法设计 IV. ①G804

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第241047号

内 容 提 要

本书是作者多年来对人体运动数据处理及运动合成方面研究成果的结集。本书主要阐述了两方面的内容: 一是人体运动数据处理中的运动检索及精简组织技术, 主要对基于预测器的人体运动无损压缩、基于样例的人体运动检索及运动数据库组织框架等技术进行了阐述; 二是人体运动的姿态生成及运动合成技术, 主要对基于草图的交互式姿态生成、基于高斯过程的人体节奏生成以及数据驱动的人体触碰运动合成等方面进行了阐述。

本书的读者对象包括计算机图形学、虚拟人运动合成等方面的研究人员及高等院校的教师和学生。

-
- ◆ 著 王鹏杰 吕 培
责任编辑 邢建春
执行编辑 肇 丽
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 11.5 2017 年 8 月第 1 版
字数: 226 千字 2017 年 8 月河北第 1 次印刷
-

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前言

近年来,随着虚拟现实、人工智能等技术的发展,围绕着虚拟人的相关技术也得到了迅速发展。虚拟人技术主要研究在几何上构建一个虚拟人物,在外形、运动、行为和情感等方面对现实人体进行数字化再现。在虚拟人运动模拟中,又以基于运动捕获技术的人体运动仿真最为稳定和成熟。运动捕获技术通过昂贵的运动捕获设备对真实演员的动作进行捕捉,而后通过相应的视觉算法得到人体运动的几何数据。这些几何数据包含人体骨骼几何数据和附着于骨骼关节上的运动数据,通常以欧拉角、四元数、轴角对等方式描述和存储。正是由于这些几何数据的默默支持,才支撑起虚拟人的细腻而逼真的动作。从智能友好的高尔夫教学训练系统到神通广大的医学步态分析系统,从《阿凡达》中纳维公主的唯美动作到“QQ炫舞”中的绚烂舞姿,无不依赖于运动捕获技术。

然而,由于捕获人体运动存在对场地要求高、过程繁琐等问题,使研究者转向对已有人体运动数据进行充分重用的研究,即基于数据驱动的人体动画技术。所谓数据驱动的人体动画,是研究如何对已捕获的人体运动数据进行充分的“拼装”,从而完成用户要求的虚拟人运动的生成与控制。而对数据“拼装”的基础则是对“拼装”小单元高效的检索及精简表示。本书首先对人体运动数据中的处理技术即人体运动压缩与检索进行了阐述,然后,对基于低维空间的人体运动合成技术进行了介绍,并重点论述了几种基于数据驱动的人体姿态生成及运动合成方法。

本书是对作者多年关于人体运动数据处理及运动合成方面的研究成果的总结。本书中有些研究内容已经在国际、国内学术会议上进行了交流,有些已经在相关学术期刊上发表。研究成果是课题组全体成员共同努力的成果。特别感谢美国德州农工大学的 Jinxiang Chai 副教授、香港城市大学的 Rynson Lau 副教授、浙江大学的许威威教授和杭州师范大学的潘志庚教授。书中引用了大量文

献，在此，向原作者表示深深的感谢。同时，也要感谢国家自然科学基金项目（项目编号：6130089, 61502433）、辽宁省自然基金项目（项目号：201602199）、文化部科技创新项目（项目号 2014KJCXXM12）、中国博士后科学基金项目（编号：2014M561228、2016T90680、2015M582203）的大力支持。

作者

2017年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 人体动画纵览	1
1.1.1 运动学控制	2
1.1.2 简单动力学控制	2
1.1.3 运动捕获	3
1.1.4 物理控制器	4
1.1.5 混合方法	5
1.2 人体基本模型	6
1.3 本章小结	8
参考文献	8
第 2 章 人体运动数据压缩技术	11
2.1 运动捕获数据压缩流程	11
2.1.1 压缩前数据预处理	12
2.1.2 几何编码	13
2.1.3 数据量化	13
2.1.4 熵编码	13
2.1.5 误差控制与矫正	13
2.2 运动捕获数据压缩方法分类原则	14
2.2.1 基于运动数据中的冗余类别进行分类	15
2.2.2 基于运动数据是否损失进行分类	16
2.2.3 基于算法部署平台进行分类	16
2.2.4 基于运动数据传送方式进行分类	16
2.3 基于消除时空域数据冗余的方法	17
2.3.1 基于曲线拟合的方法	17

- 2.3.2 基于数据降维的方法 17
 - 2.3.3 基于信号处理的方法 18
 - 2.3.4 基于四元数空间稀疏表达的方法 19
 - 2.3.5 基于关键帧提取的方法 20
- 2.4 基于消除片段域数据冗余的方法 20
 - 2.4.1 基于动作片段分析的方法 20
 - 2.4.2 基于聚类及降维的方法 21
- 2.5 本章小结 22
- 参考文献 23
- 第 3 章 人体运动数据检索技术 29
 - 3.1 运动捕获数据检索算法中的关键问题 30
 - 3.1.1 数值相似性与逻辑相似性 30
 - 3.1.2 骨架的层次结构分解 31
 - 3.1.3 索引的构建 31
 - 3.1.4 特征的选取 32
 - 3.2 基于数值相似性的检索算法 32
 - 3.2.1 基于 SOM 的方法 32
 - 3.2.2 基于 PCA 的方法 34
 - 3.2.3 其他基于数值相似性的方法 34
 - 3.3 基于逻辑相似性的检索算法 34
 - 3.4 本章小结 37
 - 参考文献 37
- 第 4 章 低维空间人体运动合成技术 42
 - 4.1 运动合成算法流程 43
 - 4.1.1 运动数据预处理 43
 - 4.1.2 运动数据降维 44
 - 4.1.3 基于最优化的运动模型及运动合成 45
 - 4.1.4 人体运动合成技术 45
 - 4.2 运动控制算法流程 51
 - 4.2.1 低维信号模拟 51
 - 4.2.2 基于最近邻查找的运动模型 51
 - 4.2.3 局部在线模型及运动控制 51
 - 4.2.4 人体运动控制技术 52

4.3 本章小结	54
参考文献	55
第 5 章 基于预测的实时运动捕获数据无损压缩方法	61
5.1 数据的分组处理	62
5.2 预测规则	63
5.3 最佳 α 值与 α 值查找表的构建	65
5.4 实验结果与讨论	66
5.4.1 不同参数组合下的压缩比	67
5.4.2 平均预测误差与压缩比	69
5.4.3 与其他压缩方法对比	70
5.5 本章小结	71
参考文献	72
第 6 章 关键帧提取与浮点压缩方法	73
6.1 特征表示方式和维度约减	73
6.1.1 骨骼夹角特征表示方法	74
6.1.2 优化的骨骼夹角特征表示方法	75
6.2 并行曲线简化方法	77
6.3 基于局部最小生成树的点模型浮点压缩方法	79
6.3.1 预测及浮点数压缩	80
6.3.2 实验结果与分析	81
6.4 基于 GPU 的无损浮点压缩方法	83
6.4.1 Lorenzo 预测器	84
6.4.2 Lorenzo 的并行方案	85
6.5 本章小结	86
参考文献	87
第 7 章 基于样例的实时人体运动数据检索	89
7.1 预处理	90
7.1.1 特征定义	91
7.1.2 运动索引提取	92
7.2 实时检索	94
7.2.1 基本相关性系数计算	94
7.2.2 等长规格化	95

7.2.3	计算匹配分数	95
7.2.4	两阶段匹配过程	96
7.3	结果和讨论	97
7.3.1	预处理阶段结果	97
7.3.2	实时检索结果	99
7.4	本章小结	103
	参考文献	104
第 8 章	人体运动捕获数据库集成框架	106
8.1	系统概述	106
8.2	运动索引和 <i>EigenDis</i> 定义	107
8.3	对压缩的运动数据库进行多步检索	108
8.4	结果与讨论	108
8.4.1	数据库创建阶段结果	109
8.4.2	实时检索阶段结果	110
8.5	本章小结	111
第 9 章	基于草绘的快速位姿检索与位姿创建	112
9.1	引言	112
9.2	相关工作	113
9.3	系统概述	114
9.4	运动数据预处理	115
9.5	图像描述符	117
9.6	局部匹配和快速位姿检索	118
9.7	基于采样的位姿提炼	120
9.8	实验	122
9.9	用户调查	127
9.10	本章小结	130
	参考文献	131
第 10 章	基于高斯过程动态模型的人体节奏运动合成	134
10.1	引言	134
10.2	相关工作	135
10.3	算法概述	136
10.3.1	节奏和运动特征提取	137

10.3.2 节奏提取	137
10.3.3 运动特征提取	138
10.4 节奏和运动特征匹配	139
10.5 运动节奏转移	139
10.6 实验结果	140
10.6.1 节奏提取结果	140
10.6.2 运动特征提取结果	141
10.6.3 GPDM 插值和节奏转移	142
10.7 本章小结	144
参考文献	145
第 11 章 基于生物力学的最优化触碰运动合成	147
11.1 引言	147
11.2 相关工作	148
11.3 基于生物力学的真实感触碰控制器	150
11.4 数据预处理	150
11.4.1 手臂触碰工作区计算	150
11.4.2 策略分类	152
11.4.3 低维空间构造	152
11.5 基于最优化的运动合成	153
11.5.1 快速最近邻查找	153
11.5.2 目标函数	153
11.6 实验	154
11.6.1 实验设置	154
11.6.2 结果	154
11.6.3 结果分析	155
11.7 本章小结	158
参考文献	158
第 12 章 基于组合控制器的触碰运动合成	161
12.1 引言	161
12.2 相关工作	162
12.2.1 触碰和抓取运动合成	162
12.2.2 基于模型的运动合成	163
12.2.3 基于组合控制器的运动合成	163

12.3 系统框架 163

12.4 控制器定义 164

 12.4.1 静态控制器 164

 12.4.2 过渡控制器 166

12.5 触碰运动合成 166

12.6 实验 167

 12.6.1 实验环境设置 167

 12.6.2 基于静态控制器的单次和连续触碰 168

 12.6.3 结合过渡控制器的试探性触碰 169

 12.6.4 手眼协同 169

12.7 本章小结 170

参考文献 171

第 1 章

绪 论

在计算机动画领域，人体动画即虚拟人动画是一个非常重要的研究方向，其成果被广泛应用于文化遗产保护、工程学测试、体育及军事仿真、影视娱乐、视频游戏等各个领域。从宏伟壮观的古罗马角斗场到身临其境的虚拟驾驶室，从智能友好的高尔夫教学训练系统到神通广大的医学步态分析系统，从《阿凡达》中纳维公主的唯美动作到“QQ 炫舞”中的绚烂舞姿，无不依赖于快速发展的人体动画技术。

1.1 人体动画纵览

角色动画自诞生到现在，历经了 100 多年的发展，从 1914 年 Winsor McCay 手绘生成的 *Gertie the Dinosaur*，到 2010 年著名好莱坞导演 James Cameron 执导的 3D 影片 *Avatar*，实践表明这是一门需要大量专业知识、训练和创作灵感的艺术。时至今日，很多电影已经不再像传统影视作品那样需要投入大量的真实演员，相反地，越来越多的动画师和电脑工程师开始参与创作。一方面，人们对角色动画有大量的需求，另一方面，完成高质量的角色动画需要投入大量的人力，人体动画研究的目的是为了解决这对矛盾，在保证生成高质量动画的同时，尽可能地减少动画师的工作量。

人体运动的生成与控制是人体动画研究的重点，目的是为了让虚拟人运动更加贴近真实的人类行为。粗略地分，人体运动的生成与控制经历了如下几个发展阶段：运动学控制、简单动力学控制、运动捕获、物理控制器以及运动捕获数据与物理模拟相结合等。下面对这些发展阶段中的方法进行简要介绍。

1.1.1 运动学控制

运动学是从几何角度（通常不涉及物体的物理属性和施加在物体上的力）来描述和研究物体位置随时间变化的力学分支。在人体动画领域，虚拟人一般被视为由关节和骨骼组成的刚体模型，运动学方法研究的对象是这些刚体的运动轨迹、位移、速度、加速度以及关节和骨骼的转动过程、角速度、角加速度等。早在 20 世纪 80 年代初期，就已经出现了人体动画的交互式设计工具以及控制虚拟人行走的模型。在这一时期，有两个非常著名的系统：美国宾夕法尼亚大学的 Badler 等^[1]开发的 JACK 系统和美国俄亥俄州大学图形学实验室的 Girard 等^[2]研制的 PODA 系统。这些系统的运动控制过程一般是这样的：首先根据人体的运动规律计算出末端执行器的运动轨迹，然后使用逆向运动学技术求解出相应的关节角度，最后通过插值计算得到最终的人体运动，如图 1.1 所示。运动学控制方法存在两个较为明显的缺点：（1）末端执行器的运动轨迹以及人体其他关节的约束很难显示定义；（2）在约束指定不当的时候，生成的运动常会违背力学规律，无法反映人体运动在动力学方面的特性。

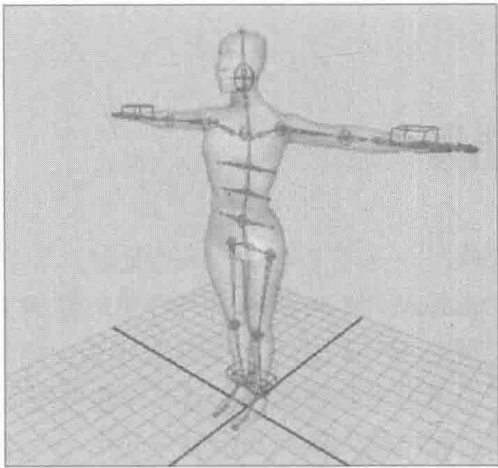


图 1.1 Maya 中的 FK/IK 及末端效应器设置

1.1.2 简单动力学控制

与运动学研究的对象不同，动力学主要研究作用于物体的力与物体运动之间的关系，研究对象一般是运动速度远小于光速的宏观物体。人体动画研究中广泛使用的是刚体动力学，在这样的动力学系统中，人体被抽象成由关节和骨骼连接

起来的机械连杆结构，通过给关节或者骨骼施加力或力矩来驱动人体运动^[3]。早期的动力学控制都非常简单，主要使用一些数值方法，如牛顿—欧拉方法或拉格朗日方法计算简单的关节链或部分人体关节。事实上，对于人体这样一个靠自身肌肉来驱动的复杂自激励系统，现阶段生物力学方面的研究还未完全掌握其内在机理，并且人类对其自身运动的物理规律也没有完全获悉，纯粹依靠求解动力学方程来生成人体运动，除了计算量非常大之外，最终生成的结果与真实的人体运动也存在不小的差距。

1.1.3 运动捕获

运动捕获设备的出现及广泛应用，很大程度上解决了上述两种方法所面临的问题。通过在人体特定位置（一般是靠近关节的地方）绑定光或电磁装置，运动捕获设备能够以极高的速率记录这些标记点的位置，再通过逆向运动学算法，计算出人体各个关节的旋转角度，进而得到真实的人体运动。在这类系统中，具有代表性的是 Vicon 公司的 Vicon Motion Systems，如图 1.2 和图 1.3 所示。一般而言，基于运动捕获数据的人体运动生成算法，得到的动画质量都非常贴近真实的人体运动，在所有方法中，这类方法的真实感是最强的。但是，这种方法也有比较明显的缺点，即所获取的运动数据只能在某些特定环境下使用，一旦应用场景发生改变，这些数据便很难被直接使用。所以，最大限度地重用已有的运动数据是基于运动捕获数据人体动画研究的一个重点。针对运动数据重用问题，研究者提出了很多不同的方法，如运动编辑、运动混合、运动连接和运动图等。

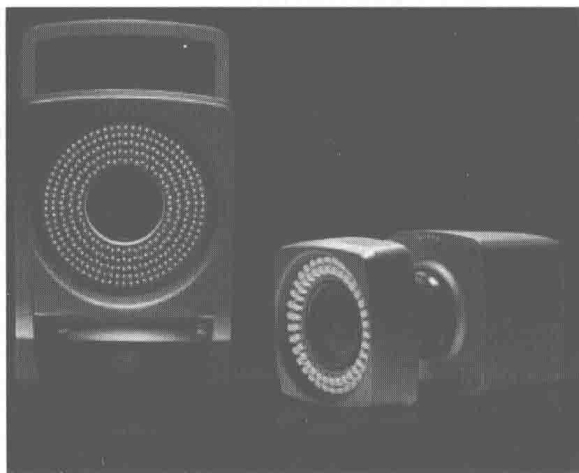


图 1.2 Vicon 光学摄像头

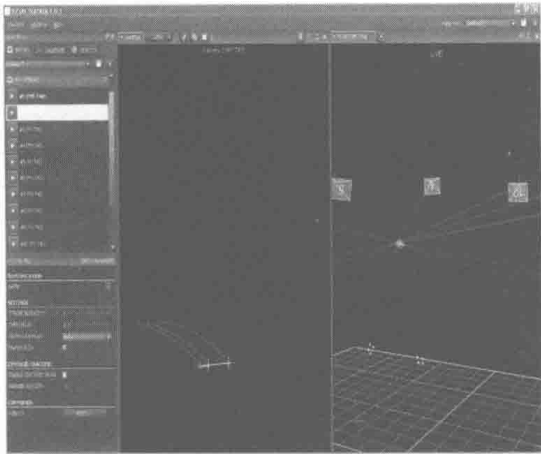


图 1.3 Vicon 软件界面

1.1.4 物理控制器

物理模拟或基于控制器方法用于动画生成，最早可追溯到 Armstrong^[4]和 Wilhelms 等^[5]的研究，自那时起，这类方法就开始被应用于一些自然现象和织物等的模拟，如火焰、流体、服装以及早期人体动画中的“布娃娃”等。直到近些年，才出现了真正意义上使用物理控制器生成虚拟人全身运动的方法。这类方法一般由 3 个部分组成：物理模拟器、物理定义的虚拟人和运动控制器^[6]。物理控制器方法非常复杂，涉及的参数也很多，因此，常与机器学习方法^[7]或其他方法相结合来优化控制参数。与直接控制虚拟人关节运动不同，这类方法将动画的生成过程视为一个累积过程，虚拟人在虚拟环境中的所有运动都是物理模拟的直接结果，与环境之间的交互也只发生在有力和力矩产生的时候。现在较为成熟的物理控制器主要用来模拟人类的行走或跑步运动，根据它们处理问题时对象抽象层次的不同，主要分为两大类：（1）关节空间中的物理控制器方法，通常需要对每个关节使用比例微分（PD）控制器，并且这些控制器由一个高维状态机调度^[3,8~12]，通过模拟运动捕获数据得到的物理控制器，如图 1.4 所示^[4]，图 1.4 利用物理控制器并结合脚印约束实现差异化运动控制，图 1.4（a）从运动捕获数据中重建转身行为，并将其应用于一个缓慢前进行走的控制器，图 1.4（b）通过增加髋关节从左到右的偏移角度，从运动捕获数据中重建一个行走控制器，使虚拟人能够以对角方式前进，在 PD 控制器的基础上，为了消除生成结果的抖动及僵硬化现象，文献[13~15]引入最优化方法来自动调节参数；（2）任务空间中的物理控制器方法，早期这类控制器主要用于机器人手臂的运动控制^[16,17]，由于这类方法是基于零空间投影的，因此，很难处理单一约束。Lasa 等^[18]提出的基于特征

的运动控制器，对上述方法进行了一定的扩展，只需要少量的特征便可以控制虚拟人平衡和末端执行器运动。

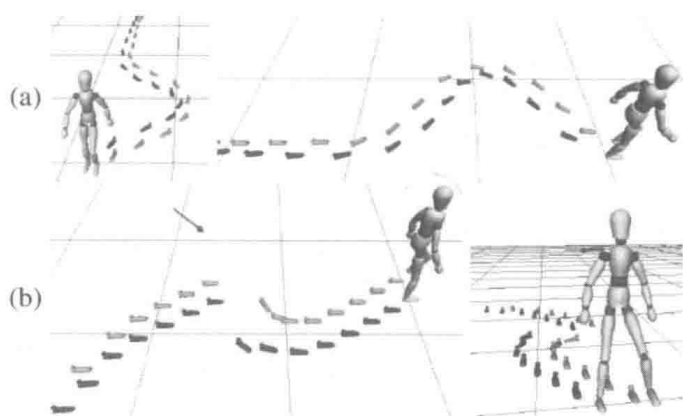


图 1.4 通过模拟运动捕获数据得到的物理控制器

1.1.5 混合方法

运动捕获数据和物理模拟相结合的方法，被称为混合方法，这类方法除了能保证人体运动的真实感之外，还可以增强虚拟人对外界环境扰动的反应能力。根据这两种方法在运动生成中主导地位的不同，该方法可以分为两种：一种以运动捕获数据为主，同时增加物理模拟过程，使虚拟人可以对外界环境的扰动产生反应^[19,20]，如图 1.5 所示^[19]；另外一种以物理模拟为主，将运动捕获数据作为参照，使用路径跟踪的方法来增强物理模拟结果的真实感^[21,22]，如图 1.6 所示^[22]，图 1.6 展示了结合运动捕获数据，可以构造出不同风格的物理控制器，上、下两行分别表示不同的风格。

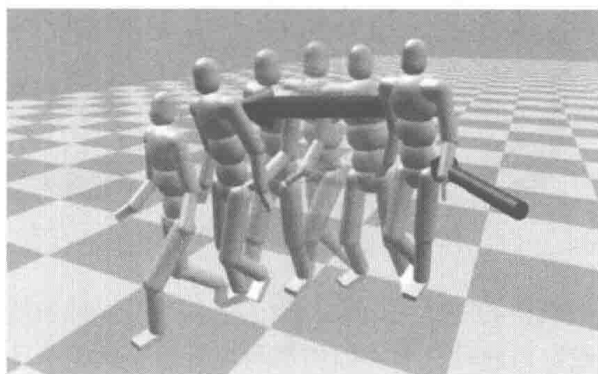


图 1.5 连续施加两次扰动外力

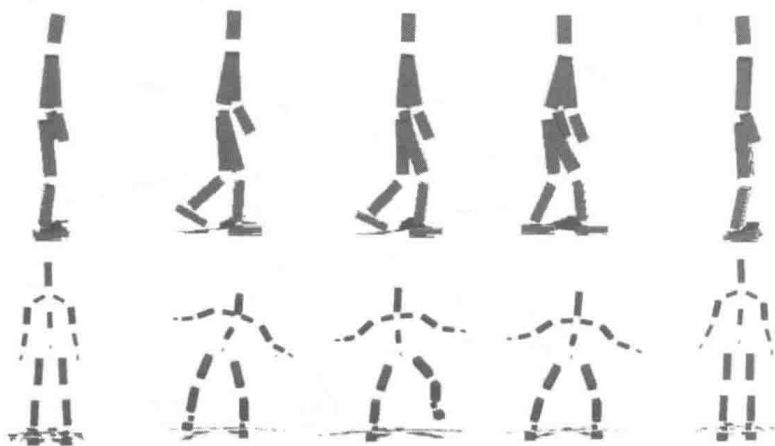


图 1.6 风格化物理控制器

1.2 人体基本模型

在虚拟人的运动合成与控制过程中，人体模型主要用于描述虚拟人的几何拓扑结构及其物理属性。这些模型都是根据实际的应用场景抽象得来的，较常用的方法是虚拟骨架模型。在这种模型中，虚拟人被视为由多条关节和刚体骨骼组成的关节链构成，这些关节链将人体的各个关节连接起来形成一个树状结构，不同骨骼或关节的运动状态都会受其父节点的影响。人体骨骼的层次结构如图 1.7 所示^[23]。

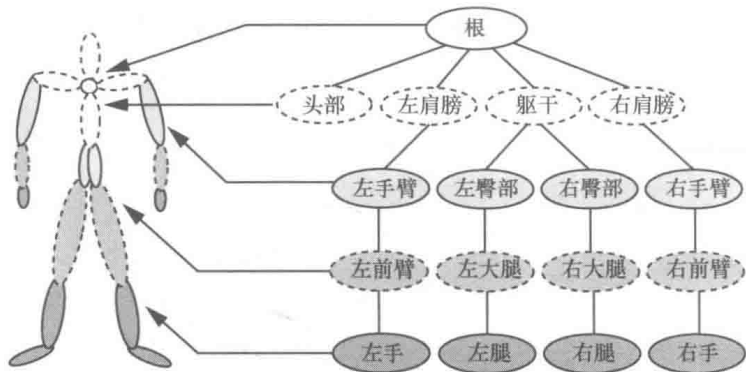


图 1.7 人体骨骼的层次结构

在构成人体骨架模型的所有关节中，除了根关节可以同时进行平移和旋转外，其他关节一般都被设定为旋转关节，即相邻两块骨骼在其关节连接处只能做相对旋转，不能做平移或其他类型的运动。在这种数据记录方式下，非根节点的关节位置