

# 人体力学行为的计算机仿真的发展及其展望

唐毅<sup>1,2</sup>, 葛运建<sup>2</sup>, 江建举<sup>2</sup>, 袁红艳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中科院合肥智能所, 合肥 230031, <sup>2</sup>中国科学技术大学自动化系, 合肥 230026)



**摘要:** 人体运动仿真是由生物力学, 计算机图形学, 机器人学等学科交叉而形成新兴的研究方向, 在许多领域都有着重大的理论和实用价值, 本文将总结人体运动的建模与仿真方法, 提出一种基于力信息传递的建模方法, 并进一步讨论了其未来发展的趋势。

**关键词:** 人体仿真; 人体模型; 生物力学; 计算机仿真

**文章编号:** 1004-731X (2004) 05-0863-05 **中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

## Computer Simulation of Human Motion and Its Tendency

TANG Yi<sup>1,2</sup>, GE Yun-jian<sup>1</sup>, JANG Jian-ju<sup>1</sup>, YUAN Hong-yi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Intelligent Machines, CAS, Hefei 230031, China)

(<sup>2</sup>Department of Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Human body simulation is a new field developing with interdisciplinary study of Biomechanics, Computer Graphics, Robotics and so on. It provides high value with theory and application. In this paper, methods of human body model and simulation will be introduced firstly, and then a method of human body modeling based on biomechanical information transfers is proposed. Finally it's tendency in the future is discussed.

**Keywords:** human body simulation; human body model; biomechanics; computer simulation

### 引言

人是社会的主宰, 人通过不断的劳动, 去认识和改造客观世界, 人在认识世界的同时也在努力地探索人自身的奥秘, 可是总的来说到目前为止人对自身的认识是非常有限的, 甚至可以说是非常肤浅的。人体科学和系统工程认为人体是一个包含在宇宙中的开放的, 复杂的巨系统, 其开放性表现在一方面人体每日每时都要通过呼吸, 摄取, 排泄与外界进行着物质和质量交换, 另一方面则通过视听, 语言, 动作进行信息的交流; 其复杂性表现在人的各组成部分具有多层次, 多功能, 复杂的结构和联系等<sup>[1]</sup>。从广义的角度来看人的生命过程就是人体的运动过程, 它既包括细胞和分子的微观运动, 也包括躯干和四肢在内时间空间的运动。随着生命科学的飞速发展, 从组织结构的角度对人体的研究已经具有突破性的进展如我国正在研制的医用虚拟人一号, 另一方面随着一门研究人体力学行为特征为主的学科—生物力学的诞生与发展, 人体的力学行为已成为人体科学的又一研究焦点。

运动生物力学是生物力学中最活跃的分枝之一, 主要研究人与动物运动的力学规律, 其研究成果广泛应用于机器人, 医疗, 工业设计, 航天以及体育科学中。人体运动的计算机仿真是运动生物力学高层次的研究内容, 具有很

高的理论和实际应用价值, 是研究人体运动规律的有效手段, 利用计算机对人体的运动进行仿真, 在很多领域都有重要的作用: 从 70 年代开始, 计算机人体仿真就开始被用于碰撞的仿真中, 主要模拟交通工具在受碰撞冲击的条件下, 人体的运动情况与损伤程度, 进而通过改善保护装置, 增强人的安全性; 此外人体运动仿真可以用来分析运动员, 残疾人, 演员等在运动过程中, 人体各个部分的速度, 加速度, 力和力矩等力学特性; 在人机工程领域在, 运动仿真可以用来评估人在有限空间中的可操作性和工作效率; 在虚拟设计中, 可以利用人体运动仿真在产品初期对其进行考察, 改进设计方案; 在机器人控制可以利用人体的力学控制特性设计控制器如仿人机器人的动态平衡能力等; 另外, 人体仿真在医疗中也有广泛的应用, 如脑神经外科诊断以及步态研究等; 此外还有一项有趣的应用, 那就是计算机动画, 计算机动画在动作描述, 影片合成与制作以及游戏娱乐等方面都有着巨大的发展和应用空间, 特别近些年随着基于仿真的运动控制算法的出现又提出了动画虚拟人的概念, 目前关于虚拟人研究的发展方兴未艾, 虚拟演员, 数字代理等已处于实用化研究阶段, 而且随着人工智能和多 AGENT 理论的引入, 虚拟人正在向着智能化和群体化方向延伸。

研究人体运动的手段和方法很多, 总体来说可以分为实验方法和数学方法两种, 本文首先总结现有的一些人体运动的计算机仿真的方法和手段, 然后提出一种基于力信息传递的建模方法及其发展趋势, 最后对人体运动仿真的未来发表一些看法。

收稿日期: 2003-02-18

修改日期: 2003-07-11

基金项目: 中科院研究生社会实践(2002 创新研究类), 安徽省自然科学基金 03042304, 国家自然科学基金 (60343006)

作者简介: 唐毅(1975-), 男, 博士生, 研究方向为 VR 技术, 复杂系统建模; 葛运建(1948-), 男, 教授, 博导, 研究方向为机器人控制, 智能仪表。

## 1 人体运动模型的发展现状

人体是由 206 块骨骼, 600 多块肌肉以及指挥这些骨骼和肌肉进行协调运动的无数的神经组成, 结构的复杂性意味着影响运动机能的因素很多, 从而带来很多的不确定性, 所以研究人体运动是一项非常复杂的工作。目前进行人体计算机运动仿真的步骤为: 建立人体的简化模型, 获取人体的惯性参数; 选定研究目标, 进行建模; 利用计算机进行仿真。所以利用计算机进行人体运动仿真的第一步就是掌握人体的形态特征。

### 1.1 人体形态与人体运动仿真

人体形态学指标包括长度指标, 体重和围度与宽度指标, 头部指标以及皮脂厚度指标 4 个部分, 也称为人体的惯性分布, 目前国内外关于人体惯性参数分布的统计有许多种如: 1958 年日本的松井秀治利用人体形态测量计算及 X 射线摄影等方法, 采用已知的比重参数计算出男女两种惯性参数; E.P Hananvan 1964 年发表了一个由 15 环节通过球铰连接的人体数学模型如图 1 所示, 这些模型将人体各环节简化为简单几何形状的匀质刚体, 推算出人体惯性参数的回归方程, 是一个比较完整的具有个性化特征的多刚体系人体模型, 这个模型也是大多数动力学建模采用的模型。

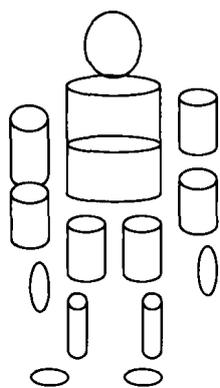


图 1 Hananvan 人体模型

另外美国的国家情报处于 1975 年发表“人体惯性性质研究”的研究报告, 给出了人体惯性参数分布的一元回归方程, 这些参数也称昌特勒参数; 德国的布拉温和非舍尔于 1989 年公布了他们关于人体全身及各部分的重量, 体积重心等研究成果; 另外俄罗斯扎齐奥尔斯基等人采用放射性同位素扫描对 100 名青年学生进行测试, 并结合统计学方法建立了回归方程, 是一个可靠的应用广泛的人体惯性参数分布材料, 以上是国外公布的人体惯性参数的资料。为了研究具有我国民族特征的人体形态, 国内学者也作了许多相关工作, 如夏长丽, 郑秀瑗等人采用了 CT 方法获得了中国正常人体的惯性参数<sup>[2]</sup>; 另外白求恩医科大学的姚树人, 吉林大学的田宏, 北京师范大学的纪仲秋等人也有相关的研究成果<sup>[3]</sup>。

### 1.2 人体运动仿真的建模方法

建模是研究人体运动的核心也是最复杂的过程, 从目前的建模方法来看, 主要有有限元分析法, 多刚体动力学, 肌肉力控制, 运动学建模以及实验等方法, 每种方法都有自己的优势和特点, 也存在各自的局限性。

**1. 有限元分析法** 人在运动中尤其在剧烈旋转运动时, 会产生明显的变形, 肌肉两端将产生较大的剪切应力, 可以认为人体是一个典型的柔性多体系统, 所以将柔性多体系统的主要分析手段有限元分析法引入到人体运动的研究中也是非常必要的。有限元分析法也称为有限元素法, 其主要的研究思想是把研究目标划分成许多微小的单元, 然后研究在外力的作用下, 各个单元的应力, 进而掌握人体在运动中各个部位的受力情况, 这种方法通常分为三个阶段: 建立模型; 加载求解; 察看和分析。这种研究手段广泛应用于碰撞实验, 损伤的预防与诊断, 虚拟制造以及运动评价之中, 但与其他工程应用相比采用有限元研究人体运动要复杂的多, 这是由于人体的有限元分析需要首先对生物组织的本构关系进行理论研究, 而人体组织的本构方程的建立本身就是一个非常复杂的过程, 另外由于生物体的几何形状并不规则, 边界条件十分复杂, 生物材料呈现高度的非线性并且具有时变特性。所幸的是由于结构动力学有限元, 边界元等理论的发展使得机构分析方法实现了程式化, 开发了功能相当完备的大型计算机软件平台如 SAP 系列, NASTRAN, ANSYS 等, 这些软件具有友好的用户界面, 只要输入结构模型的数据, 数学模型的建立与数值分析过程均由计算机自动完成, 利用这些软件可以很方便地进行人体模型的研究。

**2. 多刚体动力学** 多体动力学方法则主要根据解剖学原理将人体简化为头, 颈, 躯干, 和四肢, 确定待研究的关节链, 将关节链的每段近似为刚体, 具有质量, 质心和转动惯量, 这样就将人体简化成为具有有限个自由度的多刚体模型, 在实际的动力学分析中较多的采用 Hananvan 的人体简化模型, 此模型把人体分为 15 个独立的刚体单元, 各个单元之间通过球形铰链连结在一起。人在运动时受到复杂的外力和内力的综合作用, 如地面摩擦力, 器械或地面支撑力等, 人体各部分的重量和惯性力, 关节两端的肌肉力等, 根据实际的仿真的目的, 一般只需要考虑部分的作用力, 按照提供的人体的惯性参数, 采用多刚体模型的力学分析方法(如 Lagrange 法)将这 15 个单元看成为一个统一的整体, 建立力学方程组, 通过求解运动方程, 得到运动模型参数。该方法的关键是要计算一组约束力(或力矩), 使物体的运动符合所给定的约束, 在实际的解方程中由于涉及求导和解微分方程, 其过程比较烦琐, 一般要采用一些方法进行简化, 如 Kane 方法等。多体动力学研究方法满足牛顿定律, 在物理上概念清楚, 所以在人体运动仿真被广泛采用<sup>[4-12]</sup>, 但是由于只考虑了人体的机械特性, 忽略了人体在运动中的变形, 使得仿真出的象个机器人,<sup>[13,14]</sup>采用时间空间约束的优化处理技术对该方法作了进一步的改进, 在一定程度上提高了仿真的逼真度。

**3.肌肉力控制** 无生命物体的运动是由不平衡的外力组成,而有生命的人体的运动是由不平衡的内力(肌肉力)产生,作为整体,人体也要受其环境动力的影响,而把通常的动力学研究方法着眼于后者,这是不全面的,所以近些年来产生了基于肌肉力的仿真方法<sup>[15]</sup>,对于可变形体,可以将其模型抽象成质点-弹簧-阻尼,弹簧用来模仿能够自由伸缩的肌肉,根据合适的控制函数和激励信号使肌肉产生力和力矩,从而引起被激励部分的运动。该方法即能满足牛顿定律又充分考虑了人体的肌肉变形,但是随着要控制的肌肉数的增加,其执行机构的控制函数的推导也变得更加困难,为了克服这个困难,通常采用优化技术自动导出控制函数。

**4.运动学建模** 该方法侧重于从表象上仿真人体的运动,在满足人体的关节约束的前提下确定人体的运动学特征参数,这些参数包括运动中人体的各个关节的位置,速度,加速度等特性。运动学方法分为运动学正解方法和逆解方法,运动学正解通过确定关节链中每个关节角来获得末端的位置;而逆解则是先确定末端的位置在反推各个关节角。在计算机动画中,运动学建模方法被较多地采用,传统的动画制作技术主要采用的是关键帧技术,要制作一个比较复杂的场景将是一项非常烦琐的劳动,所以基于物理的控制技术大有取代之势。基于物理的控制技术一般采用逆运动学将运动控制转化为基于约束优化的方法,其主要的思想是采用运动学的逆解过程,将被控对象分为基座(相对不动的部分),执行器(运动末端)。利用已知条件,在时间空间状态中描述各个关节的运动状态,并根据任务和作业采用不同的目标函数,从而利用优化来确定运动状态,目标函数一般由评价运动效果的标准确定,如动作的自然程度以及如何省力等。控制运动的过程就是搜索满足约束的状态空间轨迹,并使目标函数最小化<sup>[16-23]</sup>。这种基于运动控制的方法需要解决两个关键问题:1)由于人体具有40多个自由度,在计算过程中通常面临巨大的搜索空间,为了简化计算,通常利用人体各个环节几何关系的方法进行降维<sup>[24]</sup>;2)如何提高运动控制算法的适应性,也就是如何提高同一算法对不同对象的控制能力<sup>[25]</sup>。基于运动控制的方法虽然相对简单,但缺少力学分析,难以全面地掌握运动的规律,所以如何将动力学控制耦合到运动控制中,也是值得深入研究的课题。

**5.实验的方法** 实验方法是一个非常具有前景的研究方法,充分利用实验方法中不同的测试数据,可以简化人体建模的复杂性,缩短研究周期。南非的 Hazte 已经很成功地采用实验方法模拟了一些人体的运动。利用实验方法进行人体仿真主要有两种方法:1.利用一个对象的测试数据,在不同的对象之间进行移植<sup>[26][27]</sup>;2.利用实验数据采用神经网络,遗传算法等计算智能方法进行建模<sup>[28]</sup>。采用生物力学测试手段可以得到运动捕捉数据,测力台数据以及肌肉力数据,要获得这些数据必须采用影像,多维力测力台,肌电仪等设备,但要获取全面的人体运动测试数据,必须综合利用这些设备,故此实验方法的发展很大程度上

要仰仗人体运动测试与感知技术的提高。

**6.其他方法** 此外还有一些采用其他方法如:美国的 Roberson 德国的 Wittenburg 采用了图论中理论建立了树形多体系统;德国的 R.Gawtonski 和波兰的 B.Macukow 建立了人体运动的拉氏方程;另外美国斯坦福大学的 Kane 建立了一套新的建模理论主要基于内坐标与外坐标转换的方法。这些方法基本是对传统方法的进一步改进,具有一定的实用价值。

### 1.3 人体仿真的可视化技术

人体运动仿真的可视化技术也是近年来发展比较迅猛的一项技术,80年代中期以前,由于受到计算机处理能力的制约,人体图形化建模和真实感图象生成比较困难,计算机的人体仿真偏重于数值仿真,或只能生成一些简单的图形,进入90年代随着可视化与VR技术的发展,使得生成人体的三维真实感图形成为可能。目前在人体计算机运动仿真中采用的模型由以下三类:

1.框模型 只考虑人体的骨架,结构简单不能表示扭转和接触。

2.体元模型 采用线图,棒图,椭球,圆柱等代替人体的一些基本体元,简单但不能表示变形。

3.曲面模型 用B样条曲面,Bezier曲面,Croons曲面把骨架包围起来,由于可以表现运动中关节处曲面的变化,能模拟人体的变形,具有较好的视觉效果如图2。



图2 曲面模型效果图

以上三种模型1,2两种较多地应用于科学实验中,而第3种已在商用化软件中广泛采用。

### 1.4 人体运动仿真的成果

国内外已经有一些关于人体运动的可视化计算机仿真软件,这些成果大多用于宇航与工效评估中,下面介绍一些比较典型的仿真系统。DYNMAN由US ESA开发,主要用于人机工程,包括人体模型的运动学仿真,ESA用他进行零重力和正常重力下宇航员的运动以及对航天机舱的工作环境的评估,DYNMAN可以提供不同形态特征的宇航员的三维图象模型,具有较强的可视性,但是由于没有考虑人体的动力学特性,很难掌握人体受力的情况;BOEMAN由波音公司在1969年在华盛顿开发,用于飞机座舱布局评价;加利福尼亚的RockWell International公司开发的BUFORD提供了一个围绕两臂的可达域包络空间,

用于空间站的评估; Daylion 于 1973 年设计的 COMBIMAN, 可用于飞机机务员工作站辅助设计中的视野分析和手部可达性分析; CYBERMAN 由 Chrysler 公司于 1974 年建立, 用于汽车驾驶室内部设计研究; ANYBODY 由丹麦的医学工程研究所开发, 可以作为广泛应用的 CAD 系统 CADKEY 的一个模块, 其在人机工程中广泛应用, 已成为一个商品化的软件包; 60 年代末由 Nollingham 大学建立的 SAMMIE, 是一个简洁的功绩学分析软件, 是当今比较畅销的商品话工效分析 CAD 应用系统; JACK 仿真人软件是由 Pennsylvania 大学计算机人体仿真中心开发的, 广泛运用与人体的姿态分析, 约束优化等方面, 其在许多飞机和汽车的研制以及人类工程学上已有广泛应用, 如美国科学基金会曾用 JACK 来产生人体的运动从而考察路径的选择, 目前 JACK 研究组更关注于群体行为的研究。此外还有一些基于数值仿真的多体动力学仿真软件如: 由 Chance Orlandeal 于 1981 年开发的 ADAMS 软件, Wittenburg 于 1983 年开发的 SD-EXACT, 以及我国的学者上海交大的洪嘉振, 刘延柱等开发的软件平台 DKMB, 这些软件都提供了用于人体仿真的专用模块。

## 2 人体运动仿真研究的发展趋势

要能真实地仿真人体运动在做动作时的实际情况是非常困难的, 由于人体是一个非常复杂的多体模型, 建立人体模型的通式在目前来说是不可能的, 目前一些研究方法也只是对人体模型作了不同程度的简化, 最后得到的只是一个近似的模型; 但是作为特殊的运动过程, 如果先对整个动作过程进行分解, 深入研究人体某个局部动作, 将会给建立模型带来很大程度的简化, 目前一些生物力学专家建立了某些人体运动模型, 但是仿真效果都不太理想, 其主要可能因为如下原因, 简化模型的对人体的变形考虑较少, 这种简化可能产生较大的误差, 尤其在人体的旋转过程中; 再者可能某些基于代数迭代的方法没有在实际的测试数据的基础上进行过修正, 从而产生较大的误差; 另外采用一些传统的数学手段, 如何消除奇异点也是一个值得探讨的问题, 所以一些学者正试图在建模的过程中引入一些新的研究方法和手段。

与传统的力学方法相比, 黑箱方法研究方法具有强大的生命力, 其表现在 1) 黑箱方法不需要了解模型的内部状态, 所以不会产生由于模型的简化而带来的误差; 2) 人体的力学行为是一个动态的控制反馈过程, 人体要完成一个作业必须要通过视觉, 前庭, 本体的反馈进行动态的平衡和协调控制, 而基于物理的力学模型是无法模拟人体的动态控制作用的。

但是该方法却很少被利用于人体的建模中, 我们认为可能有以下原因: 黑箱研究方法(基于统计的 AR, ARMA 模型或基于训练和学习的神经网络)的基础是利用输入输出的传递关系来研究其系统的动态性能, 而人体的力学行

为的输入输出是什么? 他们的表现形式是什么? 都没有统一的定义和规范, 所以其中还有很多基本的概念值得做深层次的探讨。此外从技术层面上讲, 首先要解决的是人体运动信息的获取与处理方法, 也就是说如何得到人体的激励(输入)和响应(输出)。所以笔者提出基于力信息的人体建模与仿真方法, 其核心是利用力信息传递的输入输出特性, 以系统的观点研究人体运动的规律, 我们知道人体的力学行为(运动)是一个主动行为, 人体要完成一个作业首先是大脑和神经控制肌肉的收缩, 然后导致人体内力的不平衡, 由力学的传递关系产生外力的不平衡, 人体正是通过外力和内力的相互转换, 从而获得整体和环节的位置, 速度和加速度, 假定在无负荷的情况下人体直立时脚力就是人体所受到的唯一的外力。如图 3 所示人体的运动是一个动态的控制过程, 控制中心是人脑和神经, 人在运动时需要高度的平衡和协调控制。

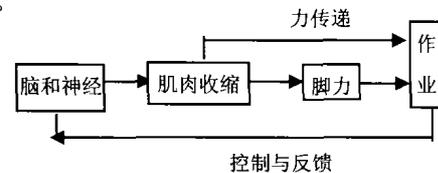


图3 人体力学行为特征

人体要完成一个作业, 首先必须要具有运动储备也就是足够肌肉的收缩能力, 更重要的是合理地分配肌肉力和脚力, 并且通过视觉, 前庭, 本体的反馈进行动态的平衡和协调控制。从力的角度来看, 人体的力学行为可以用图 2 表示, 其传递关系可以通过一个映射(1)来表示:

$$f: (F_m, F_t, M) \rightarrow (\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}) \quad (1)$$

其中  $F_m, F_t, M$  分别表示肌肉力, 脚力, 和人体的惯性矩阵,  $\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}$  分别表示肢体的位置, 速度和加速度。由于人体的肌肉数量很多, 所以该映射呈现高度的非线性, 在解决实际问题时一般要进行简化, 在此不再赘述。从图 4 中可以看出要全面掌握人体力信息传递关系进而研究其动态控制规律, 须要观测多个目标多个参数的力学量, 其中的输入量为肌肉力, 脚力, 和人体的惯性参数, 输出量为肢体的位置, 速度和加速度。

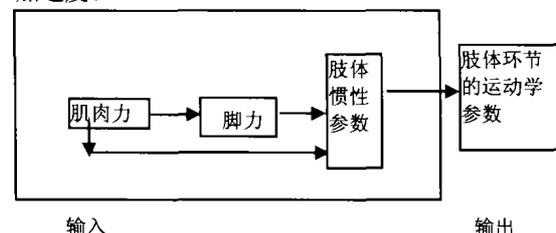


图4 人体的力传输特性

由上分析可知, 从力信息的传递关系来研究人体的力学行为概念是非常明确的, 但是从技术层面上来说还有很多问题需要解决如输入信号的产生与加载, 输入输出信号的获取, 最关键的是如何测得肌肉的力与力矩, 目前测试肌肉的收缩特性一般采用肌电的方式, 但是肌电信号与肌力矩的对应关系也只是处在研究探索阶段, 所以能否有新的

理论和方法来代替肌电,也是急需解决的问题。此外从建模的方法来说将会产生如下趋势:1)以神经网络,遗传算法为代表的计算智能方法将会越来越多地被引入到计算机人体仿真与建模之中。2)充分利用专家系统与知识工程的方法对传统的建模方法进行补充,全面了解人体运动的复杂性。3)人体是一个复杂系统。人体如何通过运动稳定地和精确地完成任任务,是一个典型反馈控制和自调节的过程,所以从系统与控制的角度研究人体运动的动态控制过程,也是一个大有前景的方向。4)对于人体运动仿真的实验方法来说,利用多种测试手段获取人体运动信息,将多目标测试数据进行融合进而进行综合决策与评价,这对人体运动的建模来说具有极其深远的意义。

需要指出的是,目前人们研究人体运动的重点是人的力学和生理学特性,而运动的心理特性(运动心理学)也可以通过输入输出特性进行研究。人的心理作用表现在对运动控制特性,运动的心理作用对原有的控制模型产生了扰动,从而使得人体对动作的控制过程产生了偏差,这种偏差(输出)是可以通过力信息进行量化的,但是人体心理学输入方法目前只能局限于感官刺激如声音和场景等,量化问题尚须进一步探讨,笔者认为随着人类力学行为的发展,人体运动的心理特性的研究将成为另一个极具挑战性的课题。

### 3 结论

总之人体运动的建模是一项艰巨而复杂的工作,理论方法可以获得带有普遍意义的运动规律揭示运动的内在机理,但模型复杂,建模困难,以黑箱方法为代表的实验方法相对简单,误差小,另外可以建立人体运动的控制模型,但是此种方法从理论方法还技术层面都有许多问题需要进一步研究。但是将不同的研究方法结合起来,利用各自的优势进行互补将是研究的重点和发展方向。另外随着人工智能方法的引入,人体的运动仿真将由单独的力学特征的仿真向具有生命特点的人工人转化,人工人的运动也将是自主的,智能的行为,而将多个人工生命的行为进行组合和协调,人工人的行为将会体现着人的另一本质—社会属性,这将是人体运动仿真中的革命性的变革。

### 参考文献:

- [1] 钱学森 论人体科学[M]. 北京:人民军医出版社,1988.
- [2] 郑秀媛等. 中国正常人体惯性参数测定和大样本统计[M]. 北京:清华大学,1993.8.
- [3] 姚树人等. 中国男性青年人体体段惯性的测算[M]. 医用生物力学 1999, 14(9), 160-161.
- [4] Terze Z., Muftic O. Dynamic Analysis of RotationalPart of Human Body Airbone Movement[J]. Kineziologija(CRO), 1995, 27(1): 3-10.
- [5] Wilhelms J. Using Dynamic Analysis for Animation of Articulated Bodies[J] IEEE ComputerGraphics&AApplications, 1987, 7(6): 12-27.
- [6] Hodgins J K. Biped Gait Transitions[A]. In Proceedings of IEEE International Conference On Robotics and Automation[C]. Los Angeles, California, 1991. 2092-2097.
- [7] Hodgins J., Raibert M. H. Biped Gymnastics[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 115-132.
- [8] Hodgins J.K ,Raibert,M.H. Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 289-298.
- [9] Badler NI, Ko HS.Animation. human locomotion with inverse dynamics[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(2): 522-536.
- [10] Bruderlin A, Calvert TW. Goal-Directed[A]. Dynamic Animation of Human Walking.Proceedings of SIGGRAPH[C]. Los Angeles, California, 1989. 233-242.
- [11] Bruderlin A,Williams L. Motion signal processing[A].Proceedings of SIGGRAPH'95[C]. Los Angeles,California,1995: 97-104.
- [12] Zicheng Liu, Steven J Gortler, MichaelF. Cohen. Hierarchical space-time control[A]. Proceedings of SIGGRAPH'94[C]. Orlando, Florida, 1994. 35-42.
- [13] A.Witkin , M.Kass. Spacetime constraints[J]. Computer Graphics, 1988, 22(4):159-168.
- [14] J.Thomas Ngo , Joe Marks. Spacetime Constraints Revisited[A]. In Proceedings of SIGGRAPH '93[C]. Los Angeles, California, 1993. 343-350.
- [15] Hodgins J.K Wooten and W.L Animating. Human Athletics[C]. In Proceedings of SIGGRAPH'95[A]. Los Angeles, California, 1995.
- [16] Jehee Lee, Sung Yong Shin. A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human like Figures[A]. Proceedings of SIGGRAPH'99[C]. Los Angeles, California, 1999. 39-48.
- [17] Girard M, Maciejewski and A.A. Computational Modeling for the computer animation of legged figures[J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 256-263.
- [18] Girard M. Interactive design of 3D computer animated legged animal motion[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987, 7(6): 39-51.
- [19] Phillipse C,Zhao J and Badler NI. Interactive real time articulated figure manipulation using multiple kinetic constraints[J]. Computer Graphics, 1990, 24(2): 245-250.
- [20] Cavagna.G.A.Thys,H.,Zamboni,A. The Sources of External Workin Level Walking and Running[J]. Journal of Physiology, 1976, 262:639-657.
- [21] McMalon T.A. Muscles, Reflexes, and Locomotion[D]. Princeton: Princeton University Press, 1984.
- [22] Takei,Y. Techniques Used by Elite Women Gymnasts Performing the Handspring Vault at the 1987 Pan American Games[J]. International Journal of Sport Biomechanics, 1990, 6: 29-55.
- [23] Badler,N.I.,Phillipse,C.B.,Webber B.L.[M]. Simulating Humans. Oxford:Oxford University Press,1991.
- [24] Ko H., Badler N.I. Straight-line Walking Animation based on Kinematic Generalization that Preserves the Original Characteristics[A]. In Proceedings of Graphics Interface'93[C]. Los Angeles, California, 1993.
- [25] Jianmin Zhao, Norman I. Badler. Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures.ACM[J]. Transaction on Graphics, 1994, 13(4): 313-336.
- [26] Michael Gleicher Peter Litwinowicz. Constraint-based Motion Adaptation[J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1997, 16, 474-480.
- [27] JK Hodgins, NS Pollard. Adapting simulated behaviors for new characters[A]. In SIGGRAPH 97 Proceedings[C]. Los Angeles, California. 1997. 153-162.
- [28] M. van de Panne , E. Fiume. Sensor-actuator networks[A]. Computer Graphics Proceedings,Annual Conference Series[C]. 1993, 8: 335--342