

数字运动员人体模型及其仿真研究

唐毅^{1,2}, 葛运建², 陈卫¹, 江建举²⁽¹⁾中国科学技术大学自动化系, 合肥 230026; ⁽²⁾中科院合肥智能所, 合肥 230031)

摘要: 提出了数字运动员的概念, 讨论了基于树型的人体结构模型及其逆运动学和动力学模型, 最后结合举重运动员的抓举动作介绍了一种基于知识的数字运动员的新型的人体模型的仿真系统结构, 其可以很好地解决关节空间的冗余参数的优化问题。

关键词: 虚拟人; 数字运动员; 人体仿真; 六维力测力台

文章编号: 1004-731X (2003) 01-0056-03 **中图分类号:** TP319.9 **文献标识码:** B

Research on Human Body Model of Digital Sportsman and Its Simulation

TANG Yi^{1,2}, GE Yun-jian², CHEN wei¹, JANG Jian-ju²⁽¹⁾University of Science & Technology of China Department of Automation, Hefei 230026, China;⁽²⁾Institute of Intelligent Machines, CAS Hefei 230031, China)

Abstract: A perception of digital sportsman is proposed, a kind of model based on tree structure and its inverse kinematics and dynamics model about digital sportsman are also discussed. Finally, we provide a new digital sportsman simulation system based on knowledge, which is suitable for optimization for articulated space.

Keywords: virtual human; digital sportsman; human body simulation; six axes measuring table

引言

人体模型的研究与发展现状

随着数字时代日新月异的发展, 虚拟现实及其仿真技术日益发挥出越来越大的作用, 作为大自然和人类社会的主宰, 人类自身的建模与仿真是理所当然地处于一个非常重要的地位。作为虚拟现实的一部分, 利用虚拟人与虚拟环境进行交互, 已经处于使用阶段, 如汽车的性能测试等场合; 作为人类的理解和表述形式符号语言的代理的虚拟人也开始在 INTERNET 上进行实用性研究阶段^{[1][2]}; 此外在计算机动画和图形学以及语言训练等方面也有广泛的应用。目前人体的建模与仿真已经成为人类工程学, 计算机图形学, 语言学, 人工生命以及生物力学研究的热点之一。

运动员仿真的研究与发展现状

虚拟的人体模型对研究运动员的动作规范性和合理性, 如何进行科学地训练具有举足轻重的地位, 如何与传统的训练方法相结合, 利用虚拟的人体模型对运动员进行合理的评判是生物力学研究的主要方法和手段之一。为此国内外许多学者建立了人体的数学模型, 其代表人物有德国的 R.Gawtonski 和波兰的 B.Macukow, 他们采用经典的分析力

学的理论基础, 推导出人体的二阶非线性拉氏方程; 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; 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的建模方法; 南非的 Hazte 采用了优化结合同步测量方法模拟了人体的运动; 在国内上海交大的刘延柱教授等也对一些运动项目如步行, 鞍马等进行了研究。以上的方法都侧重于理论上去建立运动员模型的, 并没有结合实验研究方法去处理问题, 笔者提出的基于数字运动员的仿真系统, 将采用实验测试手段与数学模型理论相结合的方法, 其关节空间冗余参数的优化方法是基于启发式知识规则的。本文首先将提出数字运动员概念。

1 数字运动员概念及其特点

我们认为所谓数字运动员是一种基于动力学与运动学实验测试数据之上的运动员人体模型, 他与传统意义上的虚拟人体仿真方法主要有两点不同。

1) 他的模型是建立于测试数据和专家知识之上的, 他的研究手段是通过实验手段与数学模型相结合的。传统意义上的虚拟人, 大都采用运动学进行形式上的仿真, 他们对于关节空间冗余参数的优化方法主要以目标函数最小化为目标的, 其基础不是基于测试数据和经验知识。

2) 研究其模型要作到运动学与动力学手段并重, 由于研究的侧重点不同, 运动员的动作通常都是非常规动作, 对动作的合理性的评判标准是成功还是失败, 不但要考虑运动

收稿日期: 2002-02-01

修回日期: 2002-04-30

作者简介: 唐毅(1975-), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究方向为系统仿真, 复杂系统建模; 葛运建(1947-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 博导, 研究方向为传感技术, 机器人控制。

学的合理性, 还要考虑导致这种结果的原因, 所以要兼顾其动力学的模型特征。对于数字运动员来说他的测试数据一般包括六维力(包括三个方向的力和三个方向的力矩)测试数据, 和采用图象解析分析手段测得的运动学参数。在生物力学的研究与测量方法上, 六维力测试数据主要采用测力台^[3], 他能测出运动员在完成动作过程中六维力数据以及压力中心的位置; 运动学参数主要是通过摄像和解析获得, 包括运动过程中各个关节的位置, 速度, 加速度以及关节角。以上的测试数据都是在运动员训练和比赛中现场测试中得到, 这些数据可以通过生物力学的分析得到相应的控制规则即专家经验和知识, 以此作为评判动作合理性的标准。

2 数字运动员的模型

2.1 人体多关节体结构

人体是一个由多个关节连接多块骨骼的复杂的非线性系统, 如图 1 所示我们可以用球状关节和刚体近似地建立一个基于树状结构的人体结构骨骼模型。可以看出树状结构的根节点的运动带动子节点一起运动, 可以通过子节点的位置反向确定父节点的位置, 这即是逆运动学的研究范畴。

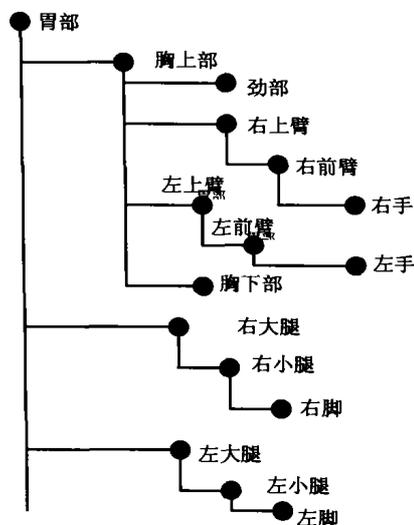


图 1 人体骨骼的树状结构

2.2 基于逆运动学的运动学仿真(见图 2)

所谓逆运动学也叫运动学逆解, 人体的逆运动学是将关节链分为基点和末端执行器, 由末端执行器的位置和旋转方向, 来反推各个关节的位置和方向。对于一个特定的任务 T 可以将其分成若干子任务即

$$\vec{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (1)$$

而 $T_i = f(q_1, q_2, \dots, q_m)$ 其中 q 为关节量, 现假设已知末端执行器 q_m 的关节量, 那么则有

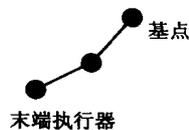


图 2 逆运动学模型

$$q_j = G(q_m) \quad (2)$$

$$C_i(q) = 0 \quad (3)$$

C 为约束条件, 通常还有一些用于优化的惩罚函数:

$$\min imize(f(q)) \quad (4)$$

由上可以看出这种逆解的方法具有冗余性, 有无数组的解, 而这无数组解则代表不同的姿态, 可以将其归结为多目标的参数优化问题, 传统的优化方法大多采用基于搜索的方法。

如图 3 所示, 人体是一个多自由度体, 大约有 40 个自由度, 对于冗余参数的优化如采用基于搜索的方法^[4], 那么会因为搜索空间的过大, 带来巨大的运算量, 通常都要采用一些方法减少自由度的数量, 如[5][6]提出的方法就成功地解决了计算量过大的问题。

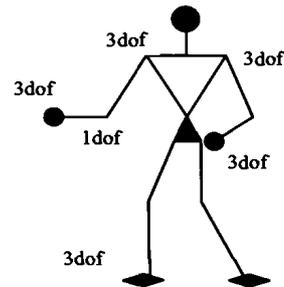


图 3 人体多自由度模型

对于数字运动员来说, 由于评价动作的合理性并不能完全取决于姿态, 所以我们提出了一种基于启发式规则的约束策略。这种方法可以通过专家知识对关节空间进行控制与调整; 另外可以更好地结合人体的动力学模型进行仿真。动力学模型在研究运动员仿真起着极其重要的作用。

2.3 动力学测试参数对运动学意义

动画虚拟人通常体现的是人体运动学特征, 但是作为人体工程学特别在生物力学的研究上不但要考虑运动学模型还必须研究其动力学特征, 才能找出动作变化的原因。下面以人体下肢的纵跳为例说明动力学研究方法, 人体纵跳的刚体模型的受力分解图如图 4 所示, 对下肢的各个部分建立刚体的力学方程:

足:

$$\sum F_x: F_{x1} - F_{x0} = m_1 A_{x1} \quad (5)$$

$$\sum F_y: F_{y1} + F_{y0} - W_1 = m_1 A_{y1} \quad (6)$$

$$\sum M: (-F_{x1}L_2 \sin \theta_3 - F_{y1}L_2 \cos \theta_3 + F_{x0}L_1 \sin \theta_3 - F_{y0}L_0 + M_1) = I_1 a_1 \quad (7)$$

小腿:

$$\sum F_x: F_{x2} - F_{x1} = m_2 A_{x2} \quad (8)$$

$$\sum F_y: F_{y2} + F_{y1} - W_2 = m_2 A_{y2} \quad (9)$$

$$\sum M: (-F_{x2}L_4 \sin \theta_3 + F_{y2}L_4 \cos \theta_2 - F_{x1}L_3 \sin \theta_2 + F_{y1}L_3 \cos \theta_2 + M_2 - M_1) = I_2 a_2 \quad (10)$$

大腿:

$$\sum F_x: F_{x3} - F_{x2} = m_3 A_{x2} \quad (11)$$

$$\sum F_y: F_{y3} - F_{y2} - W_3 = m_3 A_{y3} \quad (12)$$

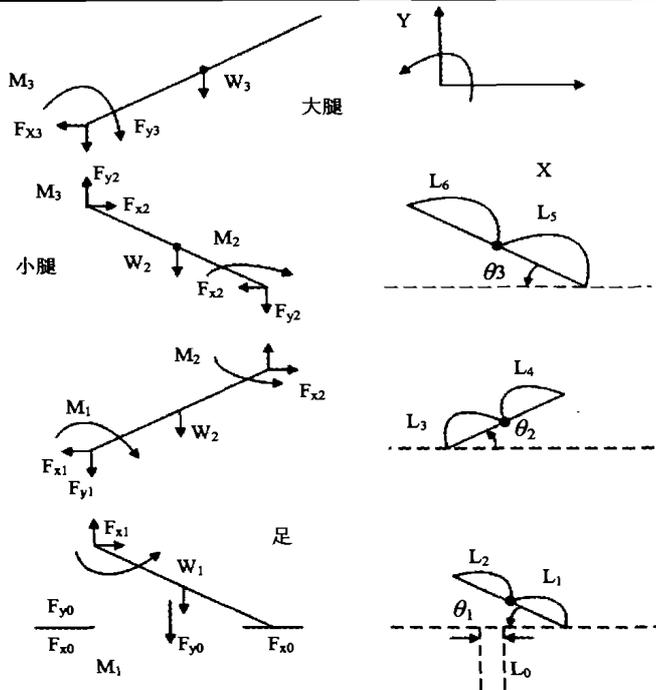


图4 下肢纵跳力学模型构

$$\sum M : (-F_x3L6 \sin \theta_3 - F_y3L6 \cos \theta_3 - F_x2L6 \sin \theta_3 - F_y2L6 \cos \theta_3 + M_3 - M_2) = I_3 a_3 \quad (13)$$

其中 m_1, m_2, m_3 分别为足, 小腿, 大腿的质量, A_{xi}, A_{yi} ($i=1,2,3$) 分别为水平 x 方向和 y 方向的加速度, I_i, a_i ($i=1,2,3$) 分别为各个部分的转动惯量和转动角加速度, W_i ($i=1,2,3$) 为各个部位的重力。对于以上方程联立根据不同的初始条件, 可以得到关节角, 这些关节与实测的图象解析的结果相结合, 就可以验证动力学模型的正确性, 从而更全面地评判动作的合理性和必然性。

3 举重运动员的运动的仿真模型

3.1 抓举动作的分解

运动员的复杂动作通常是由一些简单动作合成的, 拿抓举运动员的抓举动作来说, 可以分为引膝, 提铃, 离地, 腾伸, 以及上挺五个过程, 每个过程都有其自身的特点, 对于运动学的仿真过程来说, 首先必须考虑运动学逆解的末端与基点的变化, 也就是遍历人体关节树的方法是不同的。

3.2 基于知识的冗余参数的优化方法

数字运动员模型很大一部分要依赖物理的测试数据, 这些物理测试数据包含了作为运动员习惯动作的基本信息, 其中也包含了其动作成功与否的必然性规律, 对于现场得到的数据由生物力学专家进行解释就变成了若干条控制规则, 其中最后体现在运动员的运动学特征上, 如关节的速度以及夹角上。这些知识是我们进行冗余参数优化的核心, 所以我们提出一种基于知识的参数优化方法。

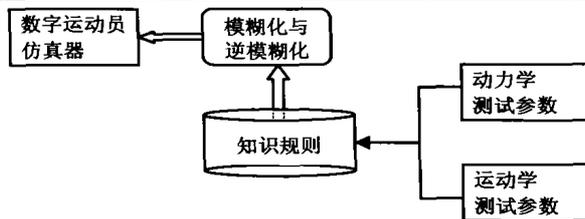


图5 数字运动员仿真系统知识库

如图5所示整个仿真系统的结构图, 对于抓举动作来说, 动作的关键是在引膝和离地后跳阶段, 对其进行力学分析后可得一些控制规则如引膝阶段有:

- 1) IF 压力中心积分面积大 THEN 引膝充分, 膝关节转动角度大
- 2) IF F_x 斜率的大则 THEN 动作频率快
- 3) IF F_y 积分正向面积大 THEN 髋关节带动上肢小腹向左摆动
- 4) IF F_y 积分负向面积大 THEN 髋关节带动上肢小腹向右摆动
- 5) IF F_x 正向积分面积小 THEN 杠铃离人体近

类似可以得到对其他的动作的控制规则, 可以看出这些由运动学测试参数和动力学测试参数提取出知识规则通常是由模糊语言来描述的, 这样必须利用一些统计结果对其进行模糊化和逆模糊化, 最后在仿真器中与逆运动学模型相结合, 产生三维的仿真结果。

4 结论

本文提出了数字运动员的概念, 并讨论了其运动学和动力学仿真模型, 最后提出了一种基于启发式知识的仿真系统模型, 并以举重运动员的抓举为例介绍了数字运动员仿真系统的体系结构, 这种模型可以更好地利用运动学和动力学实验手段去解决非常规性运动员动作的关节空间冗余参数优化问题。最后值得指出的是, 运动员仿真在国内外都还不太成熟, 尤其在国内尚在起步阶段, 还要做很多艰巨和复杂的工作。

参考文献:

- [1] Horniak M. Program for the Visual Simulation of Mimics when Speaking. Master Thesis [C]. Department of Computer Science and Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, 1999.
- [2] Sperka M. Telepresence and Human Body Modeling. Proceedings: Symposium on Telemedicine and teleeducation in Practice [A]. In: Symposium Proceedings International Symposium on Telemedicine and Teleeducation in Practice. Kosice [C]. 2000, 22-24.
- [3] 唐毅. SAFMS_T 六维力测力平台及其应用研究[D]. 中科院合肥智能所硕士学位论文, 2001.
- [4] Welman Chris :Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation [J]. Simon Frasher 1993.
- [5] Norman I, Badler Cary B. Phillips, Bonnie L. Webber. Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control [M]. Oxford University Press, 1993.
- [6] Byrd R H, Lu P, Nocedal J, Zhu C. A limited memory algorithm for bound constrained optimization [J]. SIAM J. Scientific computing, 1995, 16(5).