# 摘 要

使用运动捕获数据对三维模型进行驱动是提高三维动画制作效率的主要方法之一。该方法首先需要进行目标三维运动信息提取，即将运动捕获系统直接获取的运动三维位置数据，转换为具备完整运动信息的标准运动数据。然后根据被驱动模型的骨架，将标准运动数据与该三维模型绑定，驱动三维模型完成与运动数据动作相同的三维序列，实现基于运动参数的模型驱动。由于可以快速地生成效果逼真的三维动画，提高动画媒体的制作效率，所以该方面的研究越来越受到关注。本文从目标三维运动信息提取及三维模型驱动两个方面开展了相关研究工作，主要内容有：

目标三维运动信息提取方面，因系统误差产生的噪声，这些噪声会对整个运动效果产生影响，针对这一问题需要对原始数据进行规整，以修正运动姿态并平滑运动序列，从而消除误差使运动数据更加准确。同时，原始运动数据中存在运动信息的缺失，必须进行运动数据转换使之成为包含关节点的位置平移和方向旋转信息在内的完整的运动数据，以满足三维模型驱动及其他应用软件的需要。本文从这两方面考虑，最终实现目标三维运动信息的提取。

基于运动数据的三维模型驱动中，传统方法需要采用人工方式进行模型骨架提取、关节点匹配以及皮肤变形中的权值分配，对于批量数据处理难以提高工作效率。本文给出一种自动三维模型驱动方法，实现了模型骨架自动提取及关节点自动匹配，从而减少人工参与提高媒体制作效率。在皮肤变形方面，给出了基于热平衡权重分配的蒙皮变形技术（LBS），可得到骨骼间过渡均匀的权重，保证皮肤变形的实时性和易用性。文中最后试验证明该方法在模型驱动中保证运动的逼真性。

本文基于以上方法实现了一套完整的目标三维运动信息提取及三维模型驱动实验系统。通过大量实验证明，通过目标三维运动信息提取处理的运动数据可以保证模型逼真的运动效果，在三维模型驱动方面，用户只需要一个模型和一个运动数据文件，即可自动实现基于运动数据的三维模型驱动，生成相应动画序列，从而大幅提高动画制作效率。

**关键词：**运动捕获，数据转换，模型驱动，骨架提取，皮肤变形，

# Abstract

Currently, driving a 3D model based on motion capture data is attracting more and more attentions in 3D animation industry for its fidelity and convenience. Firstly, motion data extracting is implemented for gaining the entire motion parameter from original motion data. Then, band the motion data and a 3D model by the skeleton model, aimed for driving the 3D model based on the motion data. In this thesis, we study the extraction of motion data and 3D model automatic driving methods. The main contents are as follows:

At the aspect of extracting motion data, towards the original motion data, motion data normalization is presented for revising motion condition and smoothening motion sequence. And for the driving of a 3D model, the motion data must contain complete information of motion, including both translation and rotation information of a joint.

3D model driving based on motion data, the extraction and matching of the skeleton and the set of the skin weight are implemented manually in traditional methods. The operations are complex and needs much workload. In this thesis，an automatic method is presented for the skeleton extracting and matching, and a LBS weight distributing algorithm based on the heat balance is presented for the skin deformation.

Based on the above work, users can gain a useful motion data conveniently and the skeleton extracting and skin deformation are implemented automatically. Accordingly, users can drive the different 3D model based on the same 3D motion data by means of the methods proposed.

**Keywords:** Motion Capture, Data Transform, Model driving, Skeleton extracting, Skin deformation

# 目录

[摘 要 I](#_Toc255215825)

[Abstract II](#_Toc255215826)

[目录 III](#_Toc255215827)

[第一章 绪论 1](#_Toc255215828)

[1.1 研究目的和意义 1](#_Toc255215829)

[1.2 研究现状与发展趋势 2](#_Toc255215830)

[1.2.1 研究现状 2](#_Toc255215831)

[1.2.2 发展趋势及尚需解决的问题 5](#_Toc255215832)

[1.3 研究内容及工作安排 6](#_Toc255215833)

[1.3.1 研究内容 6](#_Toc255215834)

[1.3.2 工作安排 6](#_Toc255215835)

[第二章 运动数据规整 9](#_Toc255215836)

[2.1 引言 9](#_Toc255215837)

[2.2 动作数据平滑处理 9](#_Toc255215838)

[2.2.1 异常数据剔除 10](#_Toc255215839)

[2.2.2 运动序列平滑 11](#_Toc255215840)

[2.3 运动数据规格化 12](#_Toc255215841)

[2.3.1 局部关节位置调整 12](#_Toc255215842)

[2.3.2 全局骨架结构优化 14](#_Toc255215843)

[2.3.3 线性规划方法求解 15](#_Toc255215844)

[2.4 运动数据规整实验 15](#_Toc255215845)

[2.5 小结 16](#_Toc255215846)

[第三章 运动数据转换 17](#_Toc255215847)

[3.1 引言 17](#_Toc255215848)

[3.2 运动描述 17](#_Toc255215849)

[3.2.1 层次骨架模型 17](#_Toc255215850)

[3.2.2 关节旋转变化 19](#_Toc255215851)

[3.2.3 欧拉角 20](#_Toc255215852)

[3.2.4 四元数 22](#_Toc255215853)

[3.3 运动数据转换方法 24](#_Toc255215854)

[3.3.1关节点的空间取向 25](#_Toc255215855)

[3.3.2关节点的旋转矩阵 28](#_Toc255215856)

[3.3.3计算关节点欧拉角 29](#_Toc255215857)

[3.4 BVH运动数据文件 30](#_Toc255215858)

[3.5 运动数据转换实验 32](#_Toc255215859)

[3.6 小结 33](#_Toc255215860)

[第四章 基于运动数据的三维模型驱动 35](#_Toc255215861)

[4.1 引言 35](#_Toc255215862)

[4.2 三维模型的骨架提取 36](#_Toc255215863)

[4.2.1 模型体素切分 37](#_Toc255215864)

[4.2.2 提取中心采样点 38](#_Toc255215865)

[4.2.3 构建模型骨架 41](#_Toc255215866)

[4.3三维模型关节点匹配 43](#_Toc255215867)

[4.3.1 模糊匹配 44](#_Toc255215868)

[4.3.2 精确匹配 46](#_Toc255215869)

[4.4 三维模型的皮肤变形 48](#_Toc255215870)

[4.4.1 皮肤变形简介 49](#_Toc255215871)

[4.4.2 LBS算法 50](#_Toc255215872)

[4.4.3 基于热平衡的LBS权重分配算法 51](#_Toc255215873)

[4.5 三维模型驱动实验 52](#_Toc255215874)

[4.6小结 53](#_Toc255215875)

[第五章 实验系统环境 55](#_Toc255215876)

[5.1 引言 55](#_Toc255215877)

[5.2 系统硬件环境 55](#_Toc255215878)

[5.3 系统软件平台 56](#_Toc255215879)

[5.3.1 运动数据转换软件 57](#_Toc255215880)

[5.3.2 三维模型驱动软件 57](#_Toc255215881)

[5.4 小结 58](#_Toc255215882)

[第六章 总结与展望 59](#_Toc255215883)

[6.1 总结 59](#_Toc255215884)

[6.2 展望 59](#_Toc255215885)

[参考文献 61](#_Toc255215886)

[硕士期间参加的科研项目及发表的论文 64](#_Toc255215887)

[1、科研工作 64](#_Toc255215888)

[2、发表论文 64](#_Toc255215889)

[3、专利及软件著作权 64](#_Toc255215890)

[致 谢 65](#_Toc255215891)

# 第一章 绪论

## 1.1 研究目的和意义

本文的研究内容为目标三维运动信息提取及模型驱动方法，本课题源于国家高技术研究发展计划（863 计划）项目“提高媒体制作效率的媒体环境真实目标计算技术”。

三维运动捕获[1]作为当前一项提高媒体制作效率的备受关注的新兴技术，在国际上得到广泛研究。它通过安装在表演者身体关节处的标记物或传感器，实时获取人体各个关节位置的空间位置信息，当表演者表演时，捕获设备会检测并记录来自各个标记物或者传感器的数据，模拟出表演者的各个关节在三维空间的运动轨迹，从而获取人体运动过程中的各种姿态。随着计算机辅助设计与制作在多媒体、娱乐等各个产业中的应用，运动捕捉技术得到了长足发展并日趋成熟。以其高效率、高逼真度的特点，运动捕获技术在影视特效、动画制作、虚拟现实、游戏、三维制造业、模拟训练等诸多领域得到了成功的应用[2]。

特别是在三维动画的制作上，运动捕捉技术的引入为整个动画产业提高制作效率、降低制作成本提供了一条新的有效途径。传统的动画制作方法，动画师需要通过手工步骤逐帧对三维模型动作进行编辑，获得效果逼真的动画效果更需要丰富的动画制作经验，一般的制作人员很难达到。与之相比，三维运动捕获使得动画制作过程更为简便，动画效果更为生动、逼真。因此，运动捕获技术正成为提高计算机动画制作效率和质量的不可或缺的技术之一。

在实际应用中，获得运动数据后仍然需要利用各种大型三维制作软件如Maya、3Dmax等，对三维模型进行加工才能进行动画制作。虽然可以免去逐帧对三维模型进行编辑的工作，开发周期长，如果模型较多，工作量非常大。因此，如何才能减少其中的人工环节，将大量复杂的手工操作让计算机来完成，提高媒体的制作效率，是当前技术的研究重点之一[3]。

三维模型驱动技术是基于运动捕捉的三维动画技术的关键部分，它利用运动捕获数据与现有模型结合，模拟出原始真实目标的运动姿态。三维模型驱动技术可以自动对模型进行计算，并与运动捕获数据进行匹配，不再需要人工操作对模型的加工处理。仅仅需要提供一个三维模型和一套运动捕获数据，就可以方便地得到生动、逼真的三维动画，从而满足提高媒体制作效率的要求。三维模型驱动涉及到计算机动画、计算机视觉、人体运动学、机器人运动学、人体工程学等领域，具有重要的理论意义，在工业设计、产品开发、医学研究、服装CAD、计算机动画设计等领域有着广阔的应用前景[4]。

本文重点研究目标三维运动信息的提取以及三维模型驱动，通过运动数据规整和运动数据转换，对原始运动捕获数据进行分析处理，使之成为具有通用结构和内容的运动数据文件，然后将运动数据与三维模型结合，进而讨论三维模型驱动的方法。

## 1.2 研究现状与发展趋势

### 1.2.1 研究现状

**1. 运动参数捕获和三维运动信息提取**

运动捕获技术的出现可以追溯到20世纪70年代，迪斯尼公司曾试图通过捕获演员的动作以改进动画制作效果。运动捕获技术极大地方便了计算机动画的创作，尤其是三维动画创作，从而为动画制作领域带来了新的契机。至今，基于运动捕获数据的计算机动画创作己经成为三维动画创作的主流，人们可以更加从容地创造出精致生动的三维动画作品。

20世纪80年代，美国Biomechanics实验室、麻省理工学院、Simon Fraser大学等科研单位和机构就开始了对运动捕获相关技术的研究。此后，运动捕获技术更是吸引了越来越多的研究人员和开发商的目光，并逐步从实验研究阶段走向了产品应用阶段，很多厂商相继推出了多种多样的商品化运动捕获系统。目前，应用最为广泛的是Vicon motion system[5]和Motion Analysis system[6]系统，这些现成的运动捕获系统为用户提供了方便，但其高昂的价格注定它们不能被广大消费者接受。

从物理原理上讲，当前的捕获运动的系统主要包括以下三种方式[7]：

（1）机械系统：机械式运动捕获系统，通过依附在人体表面的机械装置来跟踪和计算运动轨迹，并利用机械装置上的电位计来测量人体关节点的位置和方向。机械系统操作简便，成本较低，但由于依附在人身体上的机械装置限制了人体运动，捕获出来的动作显得较为生硬，不够自然。

（2）电磁系统：电磁式运动捕获系统由电磁传感器发射端、接收端以及数据处理单元组成，是当前比较流行的一种运动捕获系统。它通过附着在人体关节位置的电磁传感器来记录关节点的位置数据和角度数据，将数据发送给接收端，并由数据处理单元进行结果计算。电磁系统计算准确，实时性好，而其缺点包括： 1）传感器易受外界磁场干扰，对操作环境要求苛刻；2）装置复杂，事先要对传感器进行逐个调试，以避免误差产生；3）采样率低，难以胜任快速运动的捕获。价格昂贵也是电磁系统的一大劣势。

（3）光学系统：基于视觉的运动捕获系统利用目标身上附着的标记点(marker)表示目标关节的位置，通过多路同步的高精度视频采集设备记录目标运动视频，然后对多组视频进行计算处理，从视频中提取目标的运动参数。从理论上来讲，通过三路交叉的运动视频就可以恢复出目标的运动，但为了获取更好的运动精度，人们往往需要更多甚至十几路的视频源。在充足的带宽下，光学运动捕获系统具有明显的优势：1）只需要在人体表面附着少量轻便的标记点，从而抛弃了沉重的机械支架及传感器连接线，可以使目标自由地完成运动；2）采集设备的高精度与高采样率，可以保证运动记录的连续性和稳定性，适合长时间对快速运动进行捕获；3）造价低廉，不受场地限制，可以根据需要对运动捕获系统进行调整，并能捕获身体局部细微的运动。

基于视频的运动捕捉系统，对后期视频数据处理以及运动数据计算的算法要求较高，工作流程如图1-1所示。



图1-1 视频运动捕获流程图

由图中可以看出，从采集的多路视频数据到最终可用的运动数据文件仍需要很多步骤的计算和处理。主要分为两个阶段：第一阶段为多路视频流到原始运动数据的视频数据处理，它实现了图像信息到数字信息的转化；第二阶段为原始运动数据到标准运动数据文件的运动数据计算，通过运动数据规整和运动数据转换，实现运动捕获最终结果的输出。

**2. 三维模型驱动**

三维模型驱动技术在工业设计、产品开发、医学研究、服装CAD、计算机动画设计等领域有着广阔的应用前景。当前，三维建模技术发展的很快，各种建模方法层出不穷，但要使建好的模型运动，却不是件容易的事情。

传统的做法是，首先使用三维制作软件如3Dmax，Maya等，进行几何建模，然后手动标出骨架上各个关节点的位置，并设置相应的模型皮肤顶点权重。根据骨架信息，将运动数据与模型关节点进行绑定，最终实现三维模型的动画效果。传统方法能实现比较逼真的动画效果，但是依赖于经验丰富的动画师，开发周期较长，如果模型达到一定规模，其工作量非常大。另外，动画师在使用商用软件驱动模型时候，首先要考虑运动数据的骨架结构，在模型中定义的骨架结构要和运动数据的骨架结构完全相同。如果有些运动数据，同样是人体运动，骨架结构稍有不同，那么就需要动画师修改骨架模型，影响工作效率。

如果将需要人工操作的地方改由计算机完成，那么就可以节省大量的人力、物力和时间，提高媒体的制作效率。借助计算机自动完成三维模型驱动的研究，主要涉及模型骨架的提取、关节点的匹配以及皮肤变形等多个方面。

（1）模型骨架的提取

国外在研究骨架提取方面：Teichmann[8]提出使用Voronoi图的方法，可以生成闭合多边形的层次骨架结构。但是这种方法需要手工选择一部分骨架的关节点，用于化简中间结果，才能得出最终骨架，不符合自动提取匹配的要求。Dekker[9]等人在表面模型根据模型特征来提取出一系列标记点，利用特征点来生成骨架。但是在提取模型特征时，需要针对人体不同部位的局部特征采用不同的识别方法，无法采用统一的方法和数据结构。

国内近年也开展了提取骨架模型的相关研究，对模型进行分解是解决骨架自动生成的一类新方法。庄越挺[10]等人从运动图像序列中重构人体三维运动骨架，但是基于图像特征的方法无法应用于三维模型骨架的提取。

（2）关节点的匹配

关节点匹配在模型骨架提取的基础上进一步划分骨架长度，将其与运动数据骨架模型的的各个关节点进行匹配。Xiangyang[11]定义一个标准模型，与给定的三维扫描模型进行匹配，并把匹配区分为全局映射和局部映射，使得新模型能被驱动。这些方法对模型要求太高，要求给定的扫描模型与标准模型的几何标识，姿态等要相同，而且生成的骨架结构也相同，限制了方法的应用范围。

杨长水[12]等人提出的方法对已分段的人体表面模型中各分段的骨骼进行提取并匹配到标准骨架模板上，但这种方法只对模型本身进行分段进而生成骨架，无法匹配不同结构的运动数据，而且对模型分块不满足自动提取骨架的要求。胡晓雁[13]提出一种切片标识候选关节点，并对候选关节点进行语义分析的方法，实现了关节点的匹配，但该方法易受噪声干扰，不能保证匹配的精度，且在复杂模型下不能正确标识候选关节点。

（3）皮肤变形

当前的皮肤变形技术中[14,15]，主要分为基于解剖学的和基于表面模型皮肤的皮肤变形技术，基于解剖学的皮肤变形可以达到逼真的效果，但是存在两方面的问题。一是建模过程复杂，二是变形速度慢，难以达到实时的效果。这两个问题限制了其应用范围。将骨架驱动变形和隐表面等技术与解剖学方法结合使用，以及将其多个层次融合到一个层次以构造三维人体模型和皮肤变形模型，是保证逼真性的前提下尽量提高皮肤变形速度的可行的解决方案。对于医学和体育训练等应用需要考虑更为精细的动力学模型，这就要求对肌肉的动力学特性建模，以此提高皮肤变形的真实性，这也是未来解剖学皮肤变形要研究的一个方向。表面模型皮肤变形速度较快，并且通过采用基于实例的插值变形提高了皮肤变形的逼真性。

### 1.2.2 发展趋势及尚需解决的问题

近年来，随着计算机动画技术的发展，基于运动捕获的模型驱动技术也取得长足的进展，并且应用在众多计算机动画和三维游戏制作中。但技术还在不断发展完善之中，其中主要存在的问题有以下几个方面：

I．运动信息提取方面

（1）三维运动数据规整：原始运动数据由于系统设计的缺陷，以及视频数据处理过程中产生的误差，会导致运动数据的失真，必须通过优化算法对运动结果进行修正。并且长时间的运动采集对系统带宽有一定要求，需要保持连续的动作序列的稳定。

（2）运动数据转换：基于视频运动捕获与其他方式相比，采集效率和准确性都有很大优势。但其捕获的数据结构性较差，难以满足三维模型驱动的要求。而且，在采集过程中，由运动视频得到标记点位置信息较为容易，但是无法直接得到标记点方向信息。因此，还需要对原始捕获数据进行数据转换，恢复其方向信息。

II．三维模型驱动方面

（1）模型骨架提取：未对骨架结构和模型进行分析，需要手工选定关节点，不能实现模型骨架的自动提取和匹配。

（2）关节点匹配：由于没有综合模型与运动数据的信息，无法自动匹配不同结构的运动数据。

（3）皮肤变形：虽然技术很多，但都存在实时性和逼真性的权衡问题，在保证实时性的前提下，如何保证变形效果尽可能的逼真，而且不需要手工干预，是现阶段需要考虑的问题。

## 1.3 研究内容及工作安排

### 1.3.1 研究内容

针对基于运动捕获的模型驱动中存在的三个问题，本文研究的内容主要有三个方面：一是运动数据规整，二是运动数据转换，三是三维模型驱动。

I．运动信息提取方面

（1）运动数据规整：引入线性规划方法，对运动捕获的原始数据进行优化处理，剔除无效的运动信息。根据运动统一性与流畅性原则，完成对原始运动数据的规整，使之满足后续应用需求。

（2）运动数据转换：研究三维空间中物体的运动特性，寻求运动捕获结果的有效表述方法，根据要求对运动数据进行转换。通过计算求解空间欧拉角，并生成有效地BVH格式标准运动数据文件。

II．三维模型驱动方面

1）模型骨架提取：对模型进行体素化处理并计算距离域，以模型中心采样点为基准提取模型骨架。

（2）关节点匹配：根据相关联的关节点对运动数据与三维模型进行匹配，使模型骨架可以根据运动数据完成相同的运动。

（3）皮肤变形：基于热平衡权重分配的LBS方法进行皮肤权值自动分配，将模型骨架与模型皮肤绑定起来，实现模型皮肤的运动变形。

### 1.3.2 工作安排

本文各章的内容安排如下：

第一章论述了本文研究的背景和意义，对运动捕获技术和三维模型驱动技术的现状做了扼要的介绍，同时对论文的结构进行了安排。

第二章对运动数据规整方法进行分析和研究，通过线性规划方法对原始运动数据进行全局优化，并通过帧间平滑技术对数据进行平滑处理，得到满足应用要求的运动数据。

第三章对现有运动捕获数据结构特点进行分析和对比，提出以层次骨架结构和关节旋转变化为基础的骨架模型运动描述方法。对运动数据进行转换，确定关节空间取向，计算求解欧拉角，得到标准格式运动数据文件。

第四章深入研究三维模型驱动方法，重点阐述三个方面关键问题：模型骨架提取、关节点匹配以及皮肤变形方法。实现对三维模型的自动骨架提取和关节点运动匹配。对皮肤绑定方法做出重点分析，介绍了基于LBS算法权重分配的皮肤变形技术。

第五章对整个实验环境进行了介绍，对系统硬件环境以及系统软件平台分别进行了叙述。

第六章总结了本文所做的工作和研究成果，并指出了其中的不足，进而对今后的发展方向和前景做了展望。

# 第二章 运动数据规整

## 2.1 引言

运动捕获系统通过多路同步视频采集设备，获取场景内表演者的运动视频，再经过图像处理和数据运算，计算得到目标的运动数据[16,17]。运动捕获数据可以准确地描述目标的运动姿态和运动轨迹，但由于系统自身和实验环境的限制，以及实验过程中表演者动作变化多样，不可避免地在视频采集及数据计算过程中引入误差，从而影响到整个运动数据的质量。使得取得的数据并不满足人体原始的空间结构约束而不能直接使用，需要进一步对其进行运动数据规整。

运动数据规整主要通过对原始运动数据分析处理，剔除异常运动数据，平滑运动轨迹，以减小系统误差对运动数据结果的影响。进一步对原始运动数据进行规格化整理，使其具备完整的骨架结构，作为合格的运动捕获数据结果应用于三维模型驱动以及其他领域[18]。

## 2.2 动作数据平滑处理

运动数据平滑处理，主要针对运动捕获中因系统误差产生的噪声，这些噪声会对整个运动效果产生影响，使运动序列出现抖动。系统误差主要来自于两个方面：一方面，数据采集过程中由于部分采集设备出现异常导致误差的产生，从而影响到整个运动数据的结果；另一方面，在对采集得到的多路运动视频进行图像处理和数据求解过程中，精度控制以及阈值选择的差异会造成不同的运算结果，由于精度不满足要求或者阈值选择不当也会产生运动误差。

针对以上问题，本文提出了基于运动数据帧间相关性的序列平滑处理算法，旨在平滑运动数据，减小系统误差对运动数据结果的影响，从而为各项应用提供满足要求的运动捕获数据。

运动数据平滑主要分为两步：首先，通过对骨架模型上各段骨骼长度的计算，获得各段骨骼在运动序列中的长度均值，并对各帧的骨骼长度与均值进行比较，如果某一帧中的骨骼长度与均值差异较大，则可以判断这一帧数据为存在误差的异常数据，需要对其进行剔除。其次，对于剔除的帧的数据，需要通过插值方法对其进行恢复，以保证运动数据的完整性，并通过帧间数据平滑的方法，确保运动的流畅性。

2.2.1 异常数据剔除

运动视频采集过程中，摄像机参数需要根据实验环境的变化及时进行调整，否则会造成运动视频图像质量下降，对运动图像处理产生影响。而目标三维计算过程中，如果表演者的动作过快、幅度较大，或者运动过程中大部分身体超出有效采集区域，会造成视频信息的缺失，也会对目标三维计算带来不可预知的误差。

异常数据主要包括两种，一是丢失的目标关节三维数据，丢失的数据系统会产生一个较大的值来补充，从而影响到整个目标三维结果；二是错误的跟踪结果，人体各关节点次序由跟踪算法获得，错误的跟踪结果导致目标关节点次序错误，同样影响计算结果。根据异常数据的产生原理及其特点，本文提出基于统一骨架模型的异常数据剔除方法。

运动捕获原本是为了捕获目标骨架运动特性来表示出目标的运动。但在实际操作中，由于骨架各个关节上的三维采集设备（标记点或电磁传感器）只能依附于目标表面，随着目标运动变化产生相对偏移。因此，得到的目标骨架并非理想中的固定比例与长度的骨架模型，而是每一帧都在发生形变的近似骨架模型。异常数据剔除的第一步就是要从整个运动数据中提取出统一的骨架模型：

设运动数据的总帧数为Frames，运动数据采集的骨架上的关节数为Joints，则对第N帧中的关节点三维数据可以表示为矩阵型式，记为

(2-1)

向量就表示为第N帧数据中，第i个关节点的三维坐标，其中 。

骨架模型上两个相连的关节点表示一段骨骼，骨骼长度为两关节点间的欧氏距离。假设与是两个相连的关节点，则它们之间的骨骼长度记为

(2-2)

对于所有帧中的对应的第i段骨骼，为

它们的数值应该基本一致，否则通过概率分布方法去掉其中偏离较大的数据，对于剩下的有效骨骼数据，计算其均值，

(2-3)

即为标准骨架模型上第i段骨骼的长度。

依次对所有骨骼进行计算和处理，最终得到完整的标准骨架模型骨骼长度，分别为

最后，按次序对每一帧运动数据中，各段骨骼长度与标准骨架模型进行对比。如果有某帧中骨骼长度与标准骨架模型上对应骨骼之差超出预设阈值，则视为这一帧数据中存在异常骨骼，需要对这一帧运动数据进行剔除。

2.2.2 运动序列平滑

异常数据剔除并不是将一帧包含错误关节点的运动数据从序列中直接删掉，而是利用运动数据帧间相关信息，通过线性插值方法对异常数据进行修复，修补错误的关节点，最终得到一套完整、准确的运动数据。

假设第M帧运动数据被剔除，数据中存在错误的关节点i需要恢复。取第M帧前、后各5帧的数据，即这10帧的数据，对其进行二次线性插值处理。

首先，计算关节点i的帧间偏移量，设

…

(2-4)

…

分别为关节点i在连续11帧中，每相邻两帧之间的位置偏移量。

由于在第M帧中关节点i的位置待定，其它10帧中关节点i的位置已知，根据定义可以直接计算得到这8个偏移量，而第M帧与相邻第M+1和第M-1帧之间的关节点i的偏移量和则需要通过插值计算得到。

由于动作的连续性，帧间偏移量呈一次线性关系，固可由，计算和

(2-5)

最后，由

(2-6)

或

(2-7)

计算得到的位置。

通过帧间插值方法对异常数据进行恢复是一种简单有效的方法，实际上这也是一种运动序列平滑方法，可以对运动中产生的噪音进行过滤，得到更加平稳的运动序列。其缺点是，当出现连续较多的异常数据是，很难的到合适的解决途径，平滑效果欠佳。

## 2.3 运动数据规格化

用人体骨架模型来表示人体运动无疑是一种行之有效的方法，但是标记点附着在人体表面，用来模拟人体骨架关节仍然存在一定的差异。这种差异在运动过程中会更加明显，经常大幅度的动作会引起“关节”间的距离发生变化，导致整个骨架的形变。通过运动数据平滑，已经对异常数据进行了剔除并对运动序列进行了平滑处理，但各帧数据中骨架还没有完全统一，骨架模型会随着目标运动而产生长度和比例的变形。

人类视觉对运动的物体非常敏感，再细微的骨架变化也会对整个运动效果产生影响。因此，需要通过运动数据规格化对各个帧中的骨架模型进行统一，从而避免因为运动产生的骨架模型变形。运动数据规格化首先对局部关节的调整进行分析，进而提出全局骨架的优化方法，最后通过线性规划方法建立数学模型予以解决。

2.3.1 局部关节位置调整

为了减少运动捕获过程中骨架形变对捕获结果的影响，本文提出了基于邻域空间的关节点位置调整方法。

假设某一帧数据的骨架关节点坐标表示为， i表示18个关节点编号。对每一个关节点的位置在其邻域空间内进行调整，使之达到预期的骨架关节点位置。预期的骨架关节点坐标表示为，关节点位置满足条件：

(2-8)

将相关联的两关节点之间的欧氏距离定义为一段骨骼的长度，记为。则，除根节点外，每一个关节点都对应于一段骨骼，即当前关节点与其前向关节点的欧氏距离。设与关节点关联的前向关节点为，则关节点与对应的骨骼表示为，骨骼长度满足条件：

(2-9)

运动数据应满足统一的骨架结构，并且骨架模型上的各段骨骼应具有相同长度，这里定义规格化后的骨骼长度为，即为前一节中得到的标准骨架模型各段骨骼的长度。当骨架上各个关节点的位置进行调整后，其对应骨骼长度应达到预计的要求。

首先考虑对局部骨架的调整，设关节点为三个相连的关节点，相互位置如图2-1所示。



图2-1 局部关节点位置调整

其中有两段骨骼和。经过在邻域空间对关节点进行调整，分别达到新的位置，则

(2-10)

(2-11)

(2-12)

并得到两段新的骨骼和，其骨骼长度为和

(2-13)

(2-14)

所有预期骨骼长度应符合规格化骨架模型结构，即满足条件：

(2-15)

则，对于三个关节点需

(2-16)

基于邻域空间关节点位置调整，每一个关节点只能在一定阈值距离的相邻空间内进行调整，并在得到规格化骨架的前提下，应尽可能减小对关节点的调整。对关节点需以最小的代价满足式(2-16)，得到统一骨架模型。

2.3.2 全局骨架结构优化

运动捕获的到得关节点位置信息是各个相互独立的三维空间坐标，它们之间并没有显著的关联关系。但实际上，作为人体骨架的一部分，每一个关节点都是相互关联在一起的。当对一个关节位置进行调整时，势必会影响到与其关联的后续关节点。为表述方便起见，人体骨架模型被定义为树形结构，相互关联的两个关节点被赋予父节点与子节点的关系。当父节点发生调整时也将影响其子节点的位置，经骨架向下传递，进而影响整个子树的位置。

因此，对一个关节点的调整绝非一个独立的事件，而是需要从整个骨架拓扑结构出发，对骨架进行全局优化。

对于全部18个关节点，除了根节点外，每个关节点对应一段骨骼，17段骨骼组成整个骨架模型。则对于每一段骨骼长度有

(2-17)

其中表示为的父关节点，对于调整后的关节点同样有

(2-18)

又由于

(2-17)、(2-18)、(2-19)三式联立得

(2-19)

则

(2-20)

对骨架关节点的调整是一个全局优化的过程，不能仅仅考虑局部的调整效果，要对所有关节点位置关系予以考虑，以最小的调整代价达到预期的效果，最终得到骨骼长度一致动作完整的骨架模型，实现对运动数据规格化。因此，本文选择线性规划方法对全局关节点的调整进行优化。

2.3.3 线性规划方法求解

线性规划(Linear Programming) [19,20]是运筹学的一个重要分支。在生产实践过程中，人们经常会遇到如何有效地利用现有人力、物理完成更多的任务，或在预定的任务目标下，如何消耗最少的人力、物力去实现目标等问题。对这类统筹规划问题用数学语言表达，根据问题要达到的目标选取适当的变量，问题的目标通过用变量的函数形式表示，称之为目标函数；对问题的限制条件用有关变量的等式或不等式来表达，称之为约束条件。线性规划所涉及的变量都是连续取值，且目标函数和约束条件均为线性。

从上面对问题的叙述可以看出，全局骨架结构优化就是以最小的关节点调整为代价，达到统一骨架模型的目标。对关节点的调整需从所有骨架关节点出发，且满足线性规则，可以通过线性规划方法对调整过程进行全局优化。

根据线性规划方法对全局骨架优化问题建立数学模型：

目标函数 min (2-21)

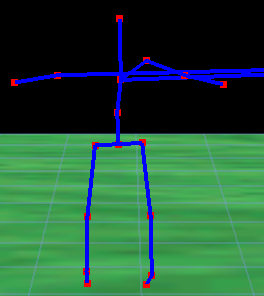
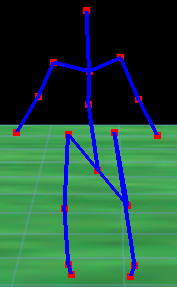
约束条件

s.t. (2-22)

其中为对每个关节的分配权值，根据的大小可以调整关节点在整个骨架中的重要性，在全局骨架对关节点调整进行控制。通过线性规划方法很容易得到满足条件且最优的，将确定的带入局部关节的位置调整中，得到满意，从而得到各个关节点的最终调整位置。

## 2.4 运动数据规整实验

通过对各个骨架关节点的调整，使得运动数据中的骨架模型达到统一骨架模型的长度和比例，从而最终实现了对运动数据的规整。

(a) (b)

图2-2 存在错误的运动数据

图2-2为存在错误的运动数据，图2-2(a)中由于一个关节点的位置信息丢失而造成错误，图2-2(b)中出现关节点顺序的错误。

|  |
| --- |
|  |
| 图2-3 运动数据规整结果 |
| 通过运动数据规整对错误的数据进行了修正，图2-3中为运动数据规整的结果，从图中可以看出，经过规整后的运动数据，有统一的骨架模型，且运动较为平稳，可以作为运动捕获的结果满足各项应用要求。 |

## 2.5 小结

本章通过对原始运动数据进行平滑处理，剔除异常数据，并通过帧间插值方法对剔除的数据进行恢复，得到平滑的运动序列；进而对运动数据进行规格化，使各帧数据统一在标准骨架模型下，避免运动中目标骨架产生形变。运动数据规格化利用线性规划方法对骨架模型进行全局优化，最终实现运动捕获数据的规整，得到格式与内容都较为整齐的运动捕获数据。

# 第三章 运动数据转换

## 3.1 引言

经过规整后的运动捕获数据在数据质量上得到了很大的提高，但要将其应用于实际工作仍需要进行文件格式转换，将原始结构的数据文件转换为具有统一格式的标准运动数据文件，才能用于各项应用。

当前几种流行的运动数据格式[21,22]，如BVH、BVA、ASF等格式的数据，有一些共同的特点：1)层次骨架结构[23]，即数据中包含的骨架模型具有一定的层次结构，用来表示人体结构。骨架数据表示为树形结构，关节间的链接结构由父、子节点关系表示出来。2)关节旋转变化[24,25]，即通过各个关节平移变换和旋转变换的合成，来表示骨架的运动和变形。关节点的平移由关节点的相对位置信息表示，而关节点的旋转信息表示为关节点的相对旋转欧拉角。

因此，将原始格式运动数据转换为标准格式运动数据，需要解决以下问题：

（1）分析骨架关联关系，划分层次结构；

（2）根据人体姿态获取各个关节的方位角度；

（3）计算旋转矩阵，求解欧拉角。

本章根据上述问题提出一套完整的运动数据转换方法，并将原始运动数据转换成为BVH格式运动数据，作为运动捕获结果进行发布。

## 3.2 运动描述

3.2.1 层次骨架模型

运动捕获中，原始运动数据是运动目标中各个关节点的空间三维坐标的集合。单纯采用空间三维坐标来描述运动是一种非层次化描述方法，各个关节点的位置参数相互独立，运动过程中任意一点的位置变化不会对其它点的位置变化产生影响。这种方法是一种简单的运动描述方法，但是并不符合真实的目标运动习惯，很容易违背人体模型中的骨架长度恒定约束，导致在后期的运动编辑时必须求解复杂的长度约束方程，影响运动捕获的真实感。

在运动数据的后期处理以及制作过程中，人们希望保留原始运动目标的某些运动属性（如运动姿势），从而容易地恢复出原始运动目标的运动。但由于真实运动目标与动画角色具有不同的身材比例和不同的骨架长度，采用非层次化运动描述方法很难满足人们的这种要求。为了克服这一缺陷，真实地表现出目标的各种运动姿态，可以使用层次化的运动描述方法。

层次骨架模型是一种具有层次化结构的目标骨架模型，它通过使用运动目标的骨架模型表示出其运动属性，较为直观的反映出目标的各种动作姿态，数据结构简单，方便存储和编辑。其层次化的结构将目标骨架模型视为一种树形结构，树的根节点是Root节点，其它节点对应模型中的各个关节点。整个骨架模型的运动是各个关节各自运动组合，各个关节点的运动是独立的，但每个关节点的运动轨迹又受到其父关节点的制约。为了遵循骨骼长度恒定的约束条件，层次骨架模型将关节点的运动分解成旋转变换和平移变换组成的。在整个骨架模型的树形结构上，Root节点的旋转决定骨架模型的方向，Root节点的平移是骨架模型中心的位置偏移。树上其它各节点的旋转，是在以其父节点为坐标原点的相对坐标系下的旋转，它决定了该节点的空间方向角度偏移（用欧拉角表示）；各节点的平移也是在其父节点空间坐标系下的位置偏移，表示相邻关节间的距离，即一段骨骼长度。以人体骨架模型为例，图3-1为人体层次骨架模型结构图。层次骨架结构在组织结构上将运动目标的各个关节点组织到了一起，从而将整个骨架的运动分解为关节点各自独立运动的组合。



图3-1 人体层次骨架模型结构图

3.2.2 关节旋转变化

在层次骨架结构的基础之上，骨架模型的运动实际上就是各个关节点运动的组合。而在运动过程中，骨架模型上每段骨骼的长度都是固定的。因此，每个关节点的运动都受到其父、子关节点的制约。当一个关节发生运动时，为了保持骨骼长度不变，与其相关联的父关节点或子关节点也必须随之调整。而在整个运动过程中，每个关节点发生运动时，必须重新计算该关节点连接的两段骨骼的长度，从而调整相关联关节位置。因此，仅仅依靠各个关节点的三维坐标偏移来表示关节点的运动变化，很难体现出各个关节点之间的关联关系，计算过程也显得较为复杂而且不易操作。

三维空间中，刚体的运动属性不仅仅体现在它的空间位置，而且还包括它的空间取向。对于任意一个三维空间坐标系，刚体的空间取向就是指该刚体定点旋转时，其自身三维坐标系与原始三维坐标系的偏移。各个关节点作为三维空间中的刚体，它的运动不仅仅包括其在空间的三维位置变化，而且还包括关节点的空间取向变化。这一点不难理解，当我们做翻转手腕的动作时，腕关节上的关节点三维位置并未发生变化，但是关节点的空间取向发生了180度的翻转。同样对于骨架上的所有关节点，都具有空间位置与空间取向的运动属性。因此在骨架运动过程中必须考虑关节点的旋转变化。

为了可以准确地描述骨架模型的运动变化，本文提出关节旋转变化的运动描述方法。通过关节旋转变化，可以保证各段骨骼长度在模型运动过程中保持恒定，并且能够清楚地表示出每个关节点的空间取向变化。当对某一关节点进行旋转之后，其子关节点的位置和方向都发生了变化。子关节点将在以其父关节点为球心的球面上运动，达到指定的位置和方向。某关节点的运动会对其子关节点产生影响，而其子关节点的运动会对更下一层的关节点产生影响，由于层次骨架结构的存在，使得该关节点的运动对整个骨骼链上的后续关节点都产生影响，使它们发生方向和位置上的变化。

在物理实质层面上，通过关节旋转变形的方法来描述骨架模型的运动，可以充分地体现出真实目标的运动本质。如同人体目标的运动，在运动过程中人体骨架本身并不会发生结构变化，骨架关联结构以及骨骼长度都保持稳定，而整个运动过程都是通过各个关节的旋转和扭动来完成的。这正是层次骨架结构以及关节旋转变化所具有的物理意义。使用层次骨架结构以及关节旋转变化的方法来对骨架模型运动进行描述，不仅可以对运算过程和数据结构进行简化，而且可以更加准确地反映出真实目标的运动特征。

3.2.3 欧拉角

莱昂哈德欧拉提出欧拉角[26,27]，来描述刚体在三维空间的取向。对于在三维空间里的一个参考系，任何刚体的空间取向，都可以用三个欧拉角来表现。参考系又称为实验室参考系，是静止不动的。而刚体自身坐标系则固定于刚体，随着刚体的旋转而旋转。刚体的旋转造成自身坐标系与实验室参考系的偏移，这一偏移就表示出刚体的空间取向。

对于三维空间中的一个刚体，它的空间取向是依照顺序，沿不同的坐标轴做三个欧拉角的[旋转](http://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E6%97%8B%E8%BD%AC)而设定的。所以，刚体的取向可以由三个基本旋转矩阵来决定。换句话说，任何关于刚体旋转的[旋转矩阵](http://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E6%97%8B%E8%BD%AC%E7%9F%A9%E9%98%B5)是由三个基本旋转矩阵[复合](http://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E5%A4%8D%E5%90%88%E5%87%BD%E6%95%B0)而成的。欧拉用三个独立的欧拉角, 即自转角、进动角及章动角来描绘刚体的空间取向。

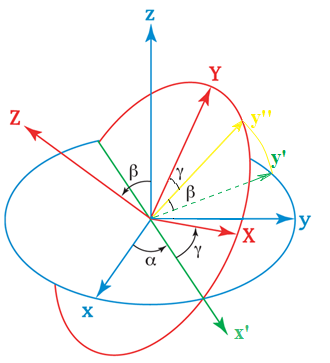


图3-2 欧拉角示意图

由图3-2所示，图中x-y-z三维坐标系（蓝色标记）为刚体的原始三维坐标系，X-Y-Z三维坐标系（红色标记）为刚体发生定点旋转之后的新三维坐标系。从图中可以看出刚体发生定点旋转之后其空间取向发生了明显的变化。新三维坐标系的X、Y、Z轴方向与初始三维坐标系的x、y、z轴方向均都发生了相对偏移，这一偏移表示出刚体当前的空间取向。而且，从图中不难看出，刚体旋转的过程中并非一蹴而就，而是通过三次单独的轴向旋转复合而成。

刚体第一次轴向旋转是以z轴为旋转轴，逆时针旋转度（遵循右手法则）。旋转之后z轴方向未发生变化，而x轴与y轴方向均发生变化。新的x轴和y轴方向分别达到向量与向量方向（绿色标记），形成一个过渡坐标系--z。

刚体第二次轴向旋转以新x轴方向为旋转轴，逆时针旋转度（遵循右手法则）。旋转轴方向没有变化，而z轴方向变到了Z向量方向，新y轴方向变到了向量方向，形成又一过渡坐标系--Z。

刚体第三次轴向旋转依然以坐标系z轴为旋转轴，不过此时z轴方向已经不是初始时x-y-z三维坐标系中z向量方向，而是刚旋转达到的Z向量方向。刚体绕--Z坐标系z轴旋转度（遵循右手法则），旋转之后刚体三维坐标系的x轴、y轴方向最终达到X向量与Y向量方向，最终形成刚体自身新的三维坐标系X-Y-Z。

在整个旋转过程中的三次单独的轴向旋转的角度、及分别对应欧拉角的自转角、进动角及章动角。而的角度组合表示刚体旋转的欧拉角，这在描述刚体空间取向的问题上较为方便。而在欧拉角应用过程中，为了使欧拉角对刚体的空间取向有唯一的表示，可以对欧拉角三个分量的取值范围做一定的限定，例如，2，。

上述对欧拉角定义的描述中，是按照“z轴—x轴—z轴”的顺序对刚体进行旋转的，被称为ZXZ顺规，照着第二个转动轴的轴名，简称为x顺规。然而，欧拉角在应用过程中并没有限定旋转轴选择的顺序。因此，只要任意两次连续的旋转，选择不同的旋转轴，都可以达到预期的效果。实际上，按照旋转轴先后顺序选择的不同，欧拉角一共有12种不同的顺规，详见表3-1。

表3-1 不同顺规的欧拉角

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 三轴设定方法 | 类型 | 序号 | 两轴设定方法 | 类型 |
| 1 | ZYX | I | 7 | ZYZ | III |
| 2 | ZXY | II | 8 | ZXZ | IV |
| 3 | YXZ | I | 9 | YXY | III |
| 4 | YZX | II | 10 | YZY | IV |
| 5 | XZY | I | 11 | XZX | III |
| 6 | XYZ | II | 12 | XYX | IV |

这些不同顺规的欧拉角在经典力学、量子力学、核子物理学以及航空航天工程学等应用领域，有着不同的选择。即使是相同的欧拉角，在不同的顺规下，所表示的空间取向也是完全不同的。因此在应用欧拉角表示刚体运动时，必须明确指出其选择的顺规方式。在运动捕获技术中，统一使用ZXY顺规的欧拉角来表示关节点的旋转变化。

3.2.4 四元数

四元数[28,29]由英国的W.R.Hamilton爵士于1843年提出，起初并未得到人们的重视。后来人们将复平面推广到四位空间，四元数也随之在刚体动力学理论中得到发展。近年来，随着计算机科学的发展，四元数被引入到计算机图像学、计算机动画领域，用来表示矢量和物体的旋转。在三维空间中，旋转矩阵、欧拉角以及四元数都用来表示刚体的旋转。与之相比，四元数在运算过程中有其他方法无法相比的优点。

在计算机图形学研究领域，通过四元数的方法来演算旋转，可以完全替代旋转矩阵的方向余弦的方法。这是因为四元数方法可以减少所需的角度运算工作，并且能够使舍入误差减到最小。并且四元数与四元数之间，方便的执行球面线性插值的能力也是很有价值。

而传统的欧拉角，由于欧拉角顺规的限定，欧拉角旋转一定要按某个特定的次序进行，等量的欧拉角变化可能引起完全不同的旋转变化结果。并且，欧拉角有可能导致自由度的丧失，造成旋转不平衡性。

与旋转矩阵和欧拉角相比，四元数在运算过程中具有内在优势：

（1）与[欧拉角](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%AC%A7%E6%8B%89%E8%A7%92)之类的表示相比，四元数表达式无奇点，对空间矢量和物体旋转的表示更加准确；

（2）采用旋转轴与旋转角度方式，运算过程比[矩阵](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%A9%E9%98%B5)更简练，快捷；

（3）单位四元数可以表示[三维空间](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%9B%E7%BB%B4%E7%A9%BA%E9%97%B4)中的一个转动。

因此，在关节旋转变化中，本文采用欧拉角表示关节点的空间取向，用来作为一种静态的描述，而在具体运算过程中，采用四元数表示关节点的旋转。使得两种旋转表示方式各尽其用，充分提高运动数据转换的效率。

**1．四元数的定义：**

设Q是实数域R上的四维向量空间，其正交基底、、、分别用表示，则Q中的元素均可以表示为四位向量q：

(3-1)

其中w、x、y、z为实数，满足

(3-2)

(3-3)

随后，上述式子被改写为抽象形式：

(3-4)

被称为为是一个四元数，其中为矢量部分，为标量。

**2．四元数的性质：**

设与分别为两个四元数，则：

（1）加法运算：

（2）乘法运算：

（3）共轭四元数：

（4）四元数的模：

此外四元数还满足数乘运算、乘法结合律、分配律、共轭等运算法则。

特别要注意的是，任意两个四元数p、q的乘积并不满足交换律，即

用四元数表示旋转：设单位矢量（矢量长度为1），以为旋转轴旋转角度的四元数表示为：

(3-5)

**3．四元数与欧拉角表示的相互转换：**

设欧拉角为，三次旋转分量由四元数表示为、和，令欧拉角对应的合成四元数为：

则有，

(3-6)

(3-7)

(3-8)

(3-9)

## 3.3 运动数据转换方法

运动捕获的原始运动数据为运动目标关节点三维坐标的集合，它通过各个关节点空间位置的变化表示出真实目标的运动。但是，真实目标的运动包含了丰富的运动信息，仅仅通过各个关节点三维坐标信息，很难完整地表示出真实目标的运动。第二章提出运动数据规整方法，已经对原始数据进行了规格化和数据平滑处理。但是，运动数据规整并没有在数据结构上和信息量上对运动数据进行更改，运动数据仍然存在一定的缺陷：

（1）运动数据中的各个关节点，空间位置相互独立，没有体现出骨架模型上各个关节点的相互关联关系；

（2）运动数据中的各个关节点，仅包含空间位置信息，没有空间方向信息，骨骼在旋转、扭曲时的运动状态难以表现出来；

（3）运动数据表示出来的目标运动，各个关节在运动过程中没有受自由度的限制，不符合真实目标的运动本质，容易造成畸形的运动效果。

总而言之，运动捕获的原始数据造成大量运动信息丢失，使得其对真实目标的运动描述显得较为简陋，很难全面地反映出真实目标运动状态，被称之为运动信息维度下降。而如何从简洁的原始运动数据中恢复运动信息维度，是当前迫切需要解决的问题。

相比原始运动数据的数学模型，这一结构的运动数据包含运动信息更加丰富，可以全面、客观地反映出真实目标的运动属性。因此，需要将原始运动数据进行转换，使之可以满足更加准确地对真实目标运动进行描述的需要。

从实质上来说，运动数据转换就是要通过一系列分析和计算，从简练的原始运动数据中提取更加丰富的运动信息，实现恢复运动数据的信息维度。同时，通过数据转换生成标准文件格式的运动数据文件，便于传播与应用。

在数据结构和文件格式上对运动捕获数据进行转换，主要涉及三个方面：

（1）以层次骨架结构与关节旋转变化重新规划运动数据，建立运动数据的运动骨架模型；

（2）提取每个关节点的空间取向，以欧拉角方式表示出关节点的空间取向；

（3）计算求解欧拉角的三个分量，最后生成标准格式运动数据文件。

其中的难点就在于各个关节点空间取向的分析，以及欧拉角三个分量的反向求解。

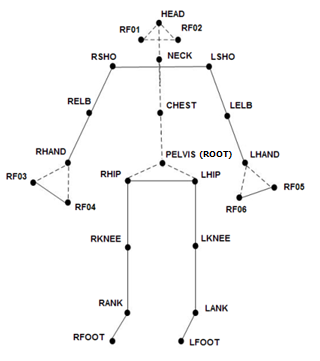


图3-3 标记点布置位置

运动数据转换需要在运动捕获之初，就对运动目标身上各个部位所要布置的标记点进行充分地考虑。并经过大量运动捕获实验，确定出效果最好的标记点放置方法。以人体目标为例，在试验中，需要在人体各主要关节点处放置关节标记点以及其它辅助标记，共包括18个关节标记点和6个辅助标记点。所有标记点布置位置如图3-3所示。

3.3.1关节点的空间取向

在对目标的运动捕获时，目标各个关节本身的运动属性，既包含自身的空间位置信息，又包含其空间方向信息。由于原始运动数据仅对这些关节的空间位置进行记录，从而忽略了各个关节点的空间取向。因此，需要通过运动数据转换从原始运动数据所包含的空间位置信息中，分析、提取各个关节点的空间取向，恢复原始目标运动状态。

骨架模型上各个关节点的空间取向，即关节点在定点旋转时，自身三维坐标系相对世界三维坐标系的旋转偏移。在三维空间中，单独一个的点的空间取向是无法确定的。因为仅仅依靠空间中的一个点，无法找到任何矢量方向的参照，无法将一个点的方向与世界坐标系联系起来。因此，要想确定空间中一个点的空间取向，仍然至少需要与其相邻的两个点（且满足三点不共线），来确定出该空间点两个矢量方向，从而确定出其自身坐标系。空间点自身坐标系与世界坐标系的方向偏移，即该空间点的空间取向。

运动数据中的各个关节点并不是相互独立的，而是通过层次骨架模型链接在一起，从而为各个关节点空间取向的确定提供参考依据。本文针对人体骨架中各个关节自身的特点，将所有关节点进行分类，并提出一套完整的关节点空间取向分析提取方法：

**1．非末端关节点的空间取向**

所谓末端关节点，根据运动捕获初始时设定的骨架结构（参见图3-3标记点布置图），就是指在骨架末端的关节点，如LHAND、RHAND、LFOOT、RFOOT以及HEAD关节点。与之相对，其余关节点即为非末端关节点。对于这些非末端关节点，它们有一个共同的特点，即每个关节点（ROOT点除外）都同时拥有父关节点和子关节点。而一个关节点的父关节点和子关节点，对其空间取向的确定具有很重要的作用。

设关节点为O，其父、子关节点分别为B和C，则以方向上的单位向量为关节点空间取向的一个分量，记为。

(3-10)

由这三个点可以确定一个空间平面OBC，平面法线为，则

(3-11)

由方向上的单位向量可以确定关节点空间取向的另一个分量，记为。

(3-12)

由已知的两个分量叉乘得到空间取向第三个分量，记为，则

(3-13)

向量 均为单位坐标向量，且两两正交。分别表示为关节点自身三维坐标系的x轴、y轴及z轴方向上的单位向量，从而确定出关节点的空间取向。可以将向量分别定义为一维行矩阵形式：

(3-14)

(3-15)

(3-16)

则关节点的空间取向可用关节点自身三维坐标系在世界三维坐标系下的空间取向旋转矩阵表示，关节点的空间取向表示为旋转矩阵：

(3-17)

**2．末端关节点的空间取向**

末端关节点由于只有父关节点，而没有子关节点，因此必须依靠辅助关节点求解其空间取向。

以HEAD点为例（参见图3-3标记点布置图），设由RF01到RF02方向的单位向量为；HEAD、RF01、RF02三个点所在平面法线方向的单位向量为；

由

(3-18)

可得到向量，从而确定关节点空间取向为：

(3-19)

**3．ROOT点的空间取向**

由于ROOT点的空间取向会影响整个模型的朝向，因此其空间取向的确定涉及到PELVIS、CHEST、LHIP、RHIP四个点之间的位置关系。

设由PELVIS到CHEST方向上的单位向量为，由LHIP到RHIP方向上的单位向量为。则，由

(3-20)

以及

(3-21)

得到向量，从而确定关节点空间取向为：

(3-22)

由此可见，对于不同关节点的空间取向的求解，方法有所不同。但主要都是利用骨架中各个关节点以及辅助标记点之间空间位置的相关性，结合本身人体骨骼特点，以及关节自由度限制，分析计算得到。如此求得的关节点空间取向，充分保留原始关节的运动属性，实现运动信息维度的恢复。

3.3.2关节点的旋转矩阵

各个关节点通过层次骨架结构有机地组织在一起。层次的骨架结构不仅方便关节点的描述和定位，同时在骨架的运动学技术上有更加重要的作用。从根节点到末梢节点，关节点的旋转变换一层一层向下传递，使关节链上的关节点更加准确地达到预期的位置和方向。

关节点的运动不再仅仅是单独的位置变化或者方向偏移，它涉及各个相关联的关节点之间的运动传递。每一个关节点的运动都受到其父关节点以及所有祖辈节点运动变换的影响。简单地来说，根节点旋转和平移变换会影响到整个骨架的位置和姿态，而其它关节点的旋转和平移变换会对其子节点运动姿态产生影响，以此类推。

以RFoot关节点为例，设RFoot在三维空间的绝对位置为，绝对空间取向为，则经过各级关节点的运动传递得：

(3-23)

其中，分别表示ROOT、RHip、RKnee以及RAnkle的相对位置偏移，即原始骨架模型中各关节点在其父关节点坐标系下的相对坐标。对应于，即为初始状态下RFoot在RAnkle坐标系下的相对坐标。同样定义，为各个关节点在其父关节点坐标系下的相对方向偏移。由于ROOT的父节点，实质是三维空间坐标系的原点，因此与也就是ROOT的绝对空间位置及绝对空间取向。

由上述可知，RFoot最终在空间中的位置，实际上是从ROOT点到RAnkle点，骨骼链上的各个关节点运动的叠加得到的。值得注意的是，各个关节点之间的运动传递都是相对的，充分体现出层次骨架结构的结构特点，生动地反映出真实目标的运动特点。

同样对于RFoot关节点，仅对关节点的空间取向进行分析，得：

(3-24)

RFoot在空间中的绝对空间取向，同样也是前向各级关节点旋转的叠加。实际上，RFoot的绝对空间取向，也就是在RAnkle绝对空间取向的基础上再做一次旋转得到的。

在3.3.1章节中，所求得的各个关节点空间取向，均为三维空间中的绝对空间取向。而在运动传递过程中，实际需要的则是各个关节点的相对空间取向。因此，求解关节点的相对旋转矩阵，需要对公式(3-24)逆向求解，从根节点开始逐级向下计算。

设、分别表示子关节点、父关节点在世界坐标系下的绝对空间取向旋转矩阵，表示子关节点的相对旋转矩阵，则可由

(3-25)

计算得到各关节的相对旋转矩阵为

(3-26)

计算得到，即为各个关节点的相对空间取向，只需要再对其做进一步计算，即可得到最终的运动数据结果。

3.3.3计算关节点欧拉角

当获得了所有关节点的相对旋转矩阵后，需要进一步求解关节点的欧拉角。前面已经介绍过，欧拉角用来描述刚体在三维欧几里得空间的取向。对于在三维空间里的一个参考系，任何坐标系的方向，都可以用三个欧拉角来表现。本文选用的是Z-X-Y顺规的欧拉角，空间中任何关于刚体旋转的旋转矩阵，都是由按顺序沿z-轴、x-轴以及y-轴的三个基本旋转矩阵复合而成的。

根据欧拉角与旋转矩阵之间的关系，可以得出推导公式：



从上式可以得到以下方程组：

(3-28)

(3-29)

(3-30)

对上式分别求解，得

(3-31)

(3-32)

(3-33)

根据2，，可以精确计算出的欧拉角。从而将运动捕获的原始数据，转换成具有层次结构和关节旋转信息的标准格式运动数据，直接用于模型驱动等相关应用。

## 3.4 BVH运动数据文件

BVH格式的运动数据文件，是由Biovision公司定义的运动捕获数据文件。作为运动捕获业界标准文件格式之一，BVH文件标准得到了绝大多数运动捕获系统的支持，同时可以直接应用于一些主流的人体动画制作软件如 MAYA、3DMAX、Poser等[30]。BVH是Biovision Hierarchical Data的缩写，显示出文件特有的层次结构。BVH文件通过层次结构来描述人体骨架结构，由欧拉角表示出各个关节点的运动。其文件内容包含两个部分：第一部分描述了人体骨架的层次结构，即定义了一个骨架结构；第二部分是具体的运动数据，即所有关节点的旋转和平移数据。BVH文件格式见图3-4。

|  |
| --- |
|  |
| 图3-4 BVH文件格式 |

BVH文件第一部分从关键词HIERARCHY开始，以文本的形式表示出人体骨架层次结构，包括骨架中各个关节的名称、位置偏移以及各个关节对应的父、子关节关系。骨架结构如同图3-1中表示的骨架，关键词ROOT定义了人体骨架结构中的根关节，JOINT定义了人体骨架结构中的非叶子关节，EndSite定义了叶子关节。BVH文件中的每个关节信息都由两组数据来表示，一组是以关键词OFFSET标识的，表示该关节与其父关节的相对位置偏移；另一组是由关键词CHANNELS标识的，表示对该关节的运动描述通道。如对于ROOT关节其CHANNELS为6，包括3个position通道和3个rotation通道，表示在BVH文件第二部分的运动数据中有6个数据用于描述ROOT关节的运动，其中3个表示位置平移，3个表示方向旋转。对于其余关节，它们的CHANNELS仅为3个rotation通道，所以运动数据部分各有3个数据用以表示各个关节与其父关节的相对旋转偏移。局部坐标系是由其父关节的局部坐标系旋转的到的，即欧拉角。注意在BVH文件中欧拉角的旋转顺序采用的是Z-X-Y，所以在利用BVH文件时需要注意旋转矩阵乘积的顺序。

BVH文件的第二部分从关键词MOTION开始，记录了运动捕获的具体运动数据，其中还包括一些运动参数。关键词Frames后面的数字为纪录的总帧数。关键词 Frame time后面的数字记录的是采样率，如每秒钟采样30帧，那么 Frame time=l/30=0.03333。文件最后的部分是具体的运动数据。运动数据按每一帧分别保存，每一帧中包含数据的数量由之前骨架定义中所有关节CHANNELS的总和来决定。数据的具体意义根据CHANNELS顺序中的具体描述来决定。从BVH文件格式中不难看出，除了ROOT关节前3位的运动数据由Xposition、Yposition、Zposition用来表示其位置偏移外，ROOT关节后3位运动数据以及所有其它关节的运动数据都是以Zrotation、Xrotation、Yrotation的格式来表示关节的旋转，且旋转顺序为Z-X-Y。显而易见，其对应的运动数据即为各个关节的欧拉角数据，且遵循ZXY顺规。

BVH文件格式简明且信息丰富，可以全面地表示运动捕获原始目标的各种运动信息，方便各种运动姿态的计算。经过转换后的BVH运动捕获数据具有广泛的应用空间，主要体现在运动编辑、运动行为分析以及计算机三维动画等领域。尤其在三维动画的制作中，利用BVH运动捕获数据可以让三维模型模拟出与真实目标完全相同动作，从而提高三维动画的制作效率与制作水平。下一章节中，就将针对基于运动捕获数据的模型驱动方法进行介绍，来实现运动捕获数据在三维动画中的具体应用。

## 3.5 运动数据转换实验

通过运动数据转换软件直接完成了对原始数据的规整和数据转换，最后生成BVH格式标准运动数据。运动数据规整与运动数据转换过程为软件自动完成，不需人工干预，方便快捷结果准确。表3-1中列出由四帧不同动作计算得到的几个关节的欧拉角。

表3-1 四帧不同动作的关节欧拉角

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Frame 1 | Frame 2 | Frame 3 | Frame 4 |
| 左肩 | α 3.769186  β -4.051787  γ -0.873827 | α 18.041159  β -0.431473  γ 8.160958 | α 5.741678  β -0.917158  γ -2.480750 | α 7.583089  β -3.537883  γ -1.546992 |
| 左肘 | α -1.525854  β -6.844136  γ -7.289281 | α 2.090806  β -6.579830  γ -20.082567 | α 0.268551  β -11.016146  γ -5.409691 | α -1.160023  β -19.215008  γ -7.510367 |
| 左手 | α 13.185179  β 0.726305  γ -18.254271 | α 38.141510  β -8.415661  γ -38.975677 | α 11.973930  β 7.043836  γ -25.386826 | α 13.166636  β 6.009365  γ -22.621290 |

## 3.6 小结

本章根据目标三维运动信息提取的要求，对运动捕获数据进行了文件格式的转换，恢复了运动信息维度，最终生成BVH格式标准运动数据文件。运动数据转换是运动捕获的最后步骤，得到满足应用需要的运动捕获结果，从而实现目标三维运动信息的提取。

# 第四章 基于运动数据的三维模型驱动

## 4.1 引言

运动数据规整及运动数据转换已经完成了目标三维运动信息的提取，最终形成了完整可靠的运动数据文件，可以用来实现三维模型的驱动。基于运动数据的三维模型驱动需要将现有运动数据与三维模型结合在一起，使运动数据的骨架信息与选定三维模型完全贴合，从而使三维模型可以根据运动数据中的运动信息产生运动变化。其中，运动数据文件作为一个载体将运动捕获得到的真实目标三维运动信息传递给三维模型，而三维模型作为最终视觉展示的终端，将真实目标动作以计算机三维图形效果表现出来，实现三维模型驱动。基于运动数据的三维模型驱动需要完成几部分工作：

（1）三维模型的骨架提取；

（2）运动数据与三维模型的匹配；

（3）运动数据控制下的三维模型的皮肤变形。

三维模型的骨架提取就是通过对选定模型进行体素切分、中心采样点提取、构建骨架等步骤，实现模型内部骨架的提取。提取的内部骨架用于与运动数据骨架的匹配，以及对模型外形变形的控制。

运动数据与三维模型的匹配，就是将运动数据的关节点数据与模型骨架上的关节点进行匹配，以骨架关节点的方式将三维模型与运动数据关联起来，使之有相同的步调完成相同的动作。

三维模型的皮肤变形主要涉及到模型动画技术[31,32]，根据运动数据所包含的运动信息，整个模型皮肤在模型运动过程中，将产生各种运动变形效果。模型的皮肤变化由三维模型中提取的骨架关节点来控制，涉及到相关皮肤变形算法。通过采用LBS算法，最终较好地实现皮肤变形效果。

本章采用的技术流程图如下：



图4-1 模型驱动技术流程图

## 4.2 三维模型的骨架提取

三维模型的骨架提取[33,34]，起初是通过手工完成的。有经验的动画制作者根据三维模型各自的特点，利用三维制作软件逐一在三维模型上选定骨架关节点。然而手工的方法费时、费力，且由于动画制作者之间技艺水平的参差，难以保证制作出来动画质量的稳定。因此，手工方法对于少量模型的动画制作还勉强可以接受，但对于如今日益发展的动画制作产业，却显得捉襟见肘。

对于动画制作高质量、高效率的要求，国内外都对三维模型的骨架提取技术进行了深入地研究。在国外，Wade[35]利用多边形数据模型，可以得到很精确的模型骨架中线，但是提取的模型骨架中线很难找到合适的办法去提取候选关节点，因此难以实现后继的关节点匹配。Katz[36]提出了一种表面模型划分的方法。Techmann[8]提出了Voronoi骨架的方法，但其需要少量的用户交互选择骨架关节点来简化Voronoi骨架。而在国内，庄越挺[10]等人从运动图像序列中重构人体三维运动骨架，但是基于图像特征的方法无法应用于三维模型骨架的提取。

经过对当前研究现状的分析，可以发现三维模型的骨架提取过程中，所采用的方法大体都是分为两个步骤进行：先是以三维模型外形为基准，在模型内部提取模型中心区域；再根据现有骨架中线以及预设骨架结构（运动数据中的骨架结构）实现整个骨架的提取。

绝大多数方法将研究重点放在如何提取骨架中线上，花费较长的时间用以提高骨骼中线的准确度。而并没有太多在意关节点的确定，这并不利于模型驱动的整体效果的提高。为了提升整体模型驱动效率，需要将模型骨架提取与后续步骤中的关节点匹配，以及皮肤变形放在一起进行综合考虑。从模型结构以及运动数据特点出发，本文提出基于模型体素空间距离域的骨架提取方法：

首先，分裂模型体素，并通过对模型体素空间距离域的控制，选取靠近模型中心的体素，作为模型骨架上的中心采样点。求解距离域时，需要对模型体素进行分析，确定体素分裂区域，计算相邻体素之间的梯度，提高分裂速度。

其次，对候选采样点进行初步筛选，对于密度较高、位置相近的中心采样点，选取其中少量点进行替代，从而起到稀疏中心采样点的作用。中心采样点初步筛选过程，应考虑到被保留中心采样点位置的重要性和代表性，可以通过邻域空间候选点密度来控制选择过程。

最后，根据目标骨架特征，从中心采样点中选定较为连续的中心点，从而完成整个骨架提取工作。

由于三维模型精度的不同，需要对模型骨架提取过程进行有效控制，不能在此耗费过多的时间。重要的是提取出来的模型骨架，必须满足与运动数据匹配的需要。因此，在模型骨架提取过程中，要充分考虑处理效率，通过算法的改进实现效率的提升。

### 4.2.1 模型体素切分

在计算机图形领域传统三维实体表示方法，主要通过矢量图形对三维实体进行表示，其中包括构造实体几何法、边界表示法、扫描表示法等[37]。这些表示方法只能表示出三维实体的表面信息，而不对实体内部及外部空间作特别的划分处理。在它们看来，空间实体仅为一层外表结构，其内部和外部都为空间均匀介质。计算机动画中的三维模型就是通过表面顶点以及连接顶点的三角面片来表示的。这种简单的模型结构，仅能表示出模型的表面属性，很难对其内部与外部空间进行区分，更不用说提取模型内部的骨架。因此，要在骨架提取之前对三维模型做预先的处理，即进行体素化处理[38]。

体素(voxel)，即立体像素(volume pixel)的简称，是对三维空间进行划分最小单位，是像素在三维空间的推广，它们是一组分布在正交网格中心的立方体单元。体素以恒定的向量或者标量对三维空间进行划分，被视为三维空间的最小单位，体素的边界在于相邻立方体单元的中间位置。所谓三维模型体素化(Voxelization)，就是通过空间体素方法对三维模型进行重新划分和表示，将对模型表面的矢量图形表示，转换成最接近该物体的体素表示形式，从而产生与原始模型对应的体素模型(Voxel model)。新形成的体素模型，不仅包含模型的表面信息，而且能描述模型内部属性，具有完整的空间信息。

模型的体素化有很多方法，其中最为流行的是基于八叉树的空间切分方法。八叉树(octree)是一种用于描述三位空间的树状数据结构，它的每个节点表示一个正方体的体积元素，每个节点有八个子节点，这八个子节点所表示的体积元素加在一起就等于父节点的体积。八叉树结构是表达三维图像的一种重要方法，在计算机图形学，计算机视觉，图像处理及景物分析等领域有着广泛的应用。八叉树的空间切分方法及其数据结构如图4-2所示。

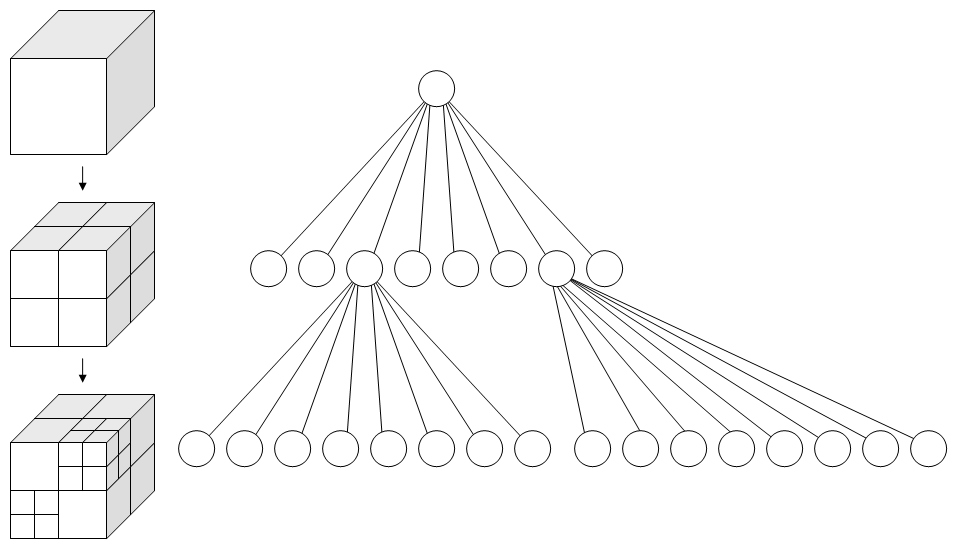


图4-2 八叉树的空间切分（左）及其数据结构（右）

### 4.2.2 提取中心采样点

模型骨架提取虽然需要对体素模型所在空间切分，但是对整个空间进行切分难于控制：单位体素设定过大难以生成细致的体素模型；单位体素设定过小势必增加切分次数，增大冗余切分开销。而只有体素切分到一定精度，才能表示出模型的细节特征，因此合理有效地体素切分策略显得格外重要。

从体素模型中提取模型骨架，首先需要提取模型中心的采样点，所以只有模型内部的体素信息有用，而对模型外部的体素切分并没有实际意义。在模型体素化过程中，可以将根据体素与模型的相对位置，确定体素的边界信息，分为模型内部、模型外部以及模型边界上，由标志位表示为

(4-1)

对于模型外部的体素可以不做处理，仅对模型内部体素进行进一步切分。

而对于模型内部的体素，也不需要都进行最细致的切分，其中仍然有一定的规律可循，即越靠近模型中心的体素需要更加细致的切分，靠近体素边界的体素可以停止切分。

综上所述，本文通过采用三线性插值适应性采样距离域(ADF)，对模型内部体素进行切分控制，根据体素距离域对体素的切分进行取舍，使之向着模型中心方向发展，便于提取模型中心的采样点。

**1．三线性插值适应性采样距离域**

三线性插值适应性采样距离域(ADF)，是由Frisken[39]提出的一种距离域计算方法，与其他距离域计算方法相比，它的优点是：

（1）可以精确地计算出模型内部任意体素到模型边界的距离；

（2）可以根据预期控制体素切分形式，仅对感兴趣区域的体素进行切分，对于无用的体素信息可以不做处理，从而节省距离域的构建时间。

根据提取模型中心采样点的要求，首先计算ADF内部体素与边界体素（模型边界所在体素）的距离，以及体素8个角点的线性内插。如果该内部体素的线性内插不能很好地逼近其与边界的距离，则会对该体素进行切分，得到8个子空间。ADF的生成需要定义一个距离函数和分裂准则，系统中的距离函数使用欧式距离。分裂准则如下：

计算一个体素到模型表面的欧式距离dis，利用该体素中心点的每个面和边的中心点来线性内插出一个估计距离ocdis，如果

 (4-2)

则对这个体素进行切分。采用自上而下的方法生成ADF，流程图如图4-3所示：

（1）从根节点开始，计算根节点的欧式距离；

（2）根节点的子节点，按照切分准则，递归的切分体素；

（3）如果达到最大深度，停止切分体素。



图4-3 体素切分流程图

不同的errortol对距离域的提取精度和速度有很大的影响，经实验分析，取errortol = 0.03，得到了满意的效果。

**2．提取中心采样点**

根据采样距离域可以进一步来提取一些逼近模型中心的采样点。

首先，遍历八叉树，搜索每一个体素，计算体素和它相邻的每一个体素的梯度向量。如果两者之间的角度大于某一角度阈值时，对其做进一步判断。

其次，当前体素到模型表面的欧式距离dis，如果dis大于某一距离阈值l时就把这个体素加入中心表面采样点集中。

实验中取、，这样提取的采样点要既逼近了中心表面而又不会产生过度的采样点，并过滤了一些比较靠近模型表面的采样点。通过两个模型中心采样点的提取效果，可以看出提取的采样点很好的逼近了模型的中心，如图 4-4所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图4-4 模型中心的采样点提取效果 | |

### 4.2.3 构建模型骨架

虽然通过距离域的约束，提取了一系列靠近模型中心的采样点，但从如此众多的采样点中确定模型骨架仍然是一个棘手的问题[40]。必须要对中心采样点进行进一步的滤除，使之更接近骨架位置。采样点滤除过程中，应该充分考虑采样点所处位置特征，从中选择较为重要的、具有代表性的采样点进行保留，滤除冗余采样点。对于保留的采样点进行连接，确定其连接次序以及关联关系，构建骨架图，最终形成模型骨架。

**1．采样点滤除**

模型中心采样点过多过密会引入大量冗余信息，增加骨架提取的误差。采样点滤除，就是要从大量采样点中选取位置信息丰富的采样点，代表与其相邻的其它采样点，从而起到简化采样点的作用。被选取的采样点基本处于一些密集采样点集的中心位置，因此它包含了更重要的位置信息，可以作为区域的中心点。在采样点滤除过程中，可以采用添加球的方法来实现。所谓添加球指的是，所选取的采样点的一个空间邻域，在这个邻域内其它采样点因为位置没有所选点优越而被滤除。采样点滤除通过以下循环步骤实现：

（1）对中心采样点按照与模型表面的距离降序排序，转至（2）；

（2）按排序的次序从第一个球开始在模型内部添加球，球心为当前采样点球半径为采样点到模型表面距离长度，转至（3）。

（3）对添加球内的采样点进行滤除，并将滤出的点从之前的采样点序列中去除。

（4）重复（2），对序列中还未添加球的采样点进行操作，直到序列中所有的采样点都完成添加球的操作，结束。

如此而来，半径最大的球最先被添加，并且每一个球内都没有其他球的球心。通过添加球的方法可以确保距离模型表面较大的点被保留下来，这些点就是模型的中心点，它们包含了更加丰富的位置信息，更具代表性。同时，每一个添加球的内部都没有其他球的球心，从而避免了小骨骼出现的数量，为进一步确定关节点及后续优化匹配提供了保障。

**2．确立骨架图**

经过滤除后的采样点可以较为准确地概括出模型的中心位置，将这些模型中心连接起来就可以构建出准确的模型骨架。由于被保留的采样点之间并没有明显的关联信息，骨架图的连接方式多种多样，必须对采样点进行综合考虑，确定正确的采样点连接结果。

由于骨架的结构特性，需要从几个方面进行考虑：

首先，保留的采样点位于模型中心位置，它们应该为骨架上的点，而完整骨架可以由多个候选骨骼拼接而成，则候选骨骼不能过长。

其次，位于同一段骨骼上的两个采样点，它们之间的连接即为所在骨骼位置，而骨骼必然位于模型中心。但对于不同骨骼上的两个采样点，它们之间的连接将偏离骨骼的中心位置，可能出现贴近模型边界甚至穿越模型边界的现象。需要对候选骨骼的偏离情况做出判读。

因此，考虑到骨骼的稀疏性和连通性，采用了以下方法连接骨架图：

（1）对于添加球的采样点，如果两个球相交，则对两个球心处的采样点进行连接，形成候选骨骼。

（2）计算候选骨骼上的点到模型边界的距离，如果其中任意一点与模型边界的距离小于球的半径的1/2，则认为候选骨骼偏离模型中心而接近模型表面。则这两个采样点为不同骨骼上的点，它们的连线不是正确的骨骼，需要将其从候选骨骼中去除。

图4-5中为两个不同模型的骨架图构建结果。从中可以看到骨架图是通过采样点的连接形成，确保了骨架在模型中的中心位置，从而保留了模型的骨架信息。骨架图的顶点就是候选关节点，形成的连接就是候选骨骼，模型骨架提取为后面的关节点匹配奠定了基础。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图4-5 连接采样点形成骨架图 | |

## 4.3三维模型关节点匹配

经过三维模型的骨架提取，已经得到精确地模型骨架，用来表示出模型的中心位置信息。而运动数据的骨架模型，基本遵循运动捕获时原始运动目标的骨架结构，其骨骼形态、比例都与从三维模型中提取出来的模型骨架不尽相同。因此，需要对两个骨架进行关联匹配，以原始骨架（运动数据中的骨架结构）为模板，对模型骨架进行优化调整，使其可以根据原始模板的运动变化产生相同的运动效果。

三维模型提取出来的骨架既包含骨架关节处的采样点，也包含不在关节处的点。而将三维模型骨架与运动数据骨架的相互关联，就是在三维模型骨架中选取关节处的点，与运动数据骨架关节点进行匹配，寻找满足需求的关节点对应关系。关节点匹配过程中，需要考虑以下几方面因素：

（1）三维模型骨架与运动数据骨架，实际大小并不一致，首先需要对其进行比例缩放，使两者基本属于同一数量级；

（2）关节点选取数量要与原始骨骼模型相一致，不能引入过多的关节点从而影响匹配效率，也不能减少对应关节点数量而无法实现匹配。

（3）选取关节点不一定限制于模型中心，重要的是能表示出模型的关节位置，在满足匹配要求的情况下，应尽可能提高关节选取的效率。

（4）在三维模型骨架中选取关节点，需要对所有关节点综合考虑，是一个全局优化的过程，得到的匹配结果要尽可能的接近原始骨架模板；

（5）整个关节点匹配过程需要迭代优化，很难做到一次到位形成完整的匹配效果，需要分步骤进行。

以人体骨架模型为例，根据其关节点分布特点，主要采用两个层次匹配的方法来实现全部18个关节点的匹配工作：

首先，通过模糊匹配完成基本骨架的匹配，骨架上对应骨骼的长度比例、关节点的位置、方向应当确定。

其次，模糊匹配完成后进行精确匹配，根据关节点自身特性，对匹配骨骼的细节进行修正，如对称的骨骼、关节点应匹配到模型中心等。

通过以上两步工作，将提取出的模型骨架与运动数据骨架进行了完整、准确地匹配，从而满足两个骨架运动的同步要求，为最后的模型驱动做好准备。

### 4.3.1 模糊匹配

模糊匹配的主要目的是完成基本的关节点匹配，仅需实现对应关节点的匹配，而不用太注重细节效果[41]。实际上，模糊匹配是各个关节点位置求解的优化问题，本文通过最小化判定函数的方法来求解优化问题。

根据骨架模型特点以及关节点匹配要求，设定5个约束条件，分别对骨架中特殊的关节点进行约束。相应的定义5个判定函数，用于量化约束条件。通过各个判定函数加权求和，得到最后的判定结果，从而优化匹配过程。为了便于求解，要根据经验提取关节特征，如骨架的对称性、骨骼长度、脚关节位置等，具体判定约束如下：

（1）骨骼对称性约束：骨架中对称的骨骼要满足骨骼长度相等的约束。如果不符，假设两个被标记为对称的骨骼，在骨架上的位置为和，半径为分别为，假设到的距离为，到的距离为

 (4-3)

判定值为。

（2）脚关节位置约束：对于标记为脚的关节，其位置必须满足在模型底部的约束。设某个标记为脚的关节坐标为，骨架图中所有顶点坐标最小的点坐标为，则判定值为。

（3）骨骼长度最小约束：父、子两个关节点之间的距离，即骨骼长度不能为0。因此，原始骨架模板中父、子两个关节点，不能与模型上同一关节进行匹配。如不满足约束，判定值为1。

（4）骨骼长度最大约束：对于大多数关节点仅有一个子关节点，其入度为1，对于这些关节点与其子关节点应当保持一定距离，如果距离很近会影响骨架比例。假设一个关节点匹配到， 它的父节点匹配到（不同于） ，如果顶点相邻于，而它的球半径至少是球半径的 1/2，那么判定值为1。

（5）骨架长宽约束：如果模型的长和宽都很大，那么匹配的关节点之间的相互距离应该较远。对于每一对关节 (在为匹配节点中不相邻的)，设是图内两点的距离， 是为球心的球半径，是其父关节点球的半径。则，如果

 (4-4)

那么判定值为1。

对于5个不同的约束条件，应考虑到它们各自计算的结果对整个匹配过程的影响。需要对五个判定函数进行加权求和，得到结果最优的组合。对于不同的约束条件，其重要程度不尽相同，因此，分配的权值也并不完全一致。对于模糊匹配的应用，5个判定函数相应的权重分别为（0.15，0.27，0.24，0.3，0.65）。

判定函数求解过程中，直接使用最小化判定函数的方法来求解问题是比较困难的，问题复杂度会根据模型复杂程度呈指数型增长。因此，需要对求解过程分步骤进行，考虑渐进的方法来简化求解形式。首先对一部分特征明显的关节点进行匹配，然后逐步添加临近的关节点，形成一个渐进的匹配过程。在所有关节点中，入度高的关节点被最先匹配，因为这些关节点对整个骨架结构的定位至关重要，包括骨盆关节、胸部关节点等，都位于身体骨架的中心，而四肢骨骼通过中心关节连接在一起。对中心关节点匹配之后，再将相连的关节点逐步匹配，得到四肢骨骼链。

具体操作中，首先对入度按从大到小进行排序，选择入度最高的关节开始匹配，添加完一层相同入度的节点后，添加它们的子节点，同样按入度大小进行，相继形成骨骼分支。设一个队列，先将第一层节点入队，计算局部的最优匹配，再逐渐加入节点。每加入一个节点，都要计算局部最优的匹配。直到所有节点加入完毕，所有节点出队，得到最后的匹配结果。

图4-6为对两个模型的骨架进行模糊匹配后的结果，从图中可以看出已经初步完成模型骨架上相应关节点的匹配。但是，匹配结果仍然不够细致，个别关节点的位置选取不太合理，需要进一步调整，如人体模型的腰部节点，四肢模型的颈部节点等。因此，需要进行下一步精确匹配，针对骨架细节对已经匹配的关节点位置进行修正。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图4-6 模糊匹配后的结果 | |

### 4.3.2 精确匹配

模糊匹配后，模型骨架上的主要关节点的匹配效果已经可以满足要求。但是仍然存在个别关节点，它们的位置并不完全处在模型的关节处，需要进一步优化调整。而造成这种情况的原因主要是，在模糊匹配中对于这些不处于重要位置的关节点，没有足够的权重对其匹配过程产生影响。考虑到整体骨架的匹配效果，应该首先保证主要关节点的正确匹配，而相应减小非主要关节点的影响权重。因此，在模糊匹配之后仍然需要进行精确匹配，对没有达到预期位置的关节点重新设定判定函数以及分配相应的权重，从而对关节点位置进行纠正。

由于模糊匹配已经提取了一个基本正确的骨架结构，在精确匹配时只需要修改相应判定约束，匹配的方法仍然采用最小判定函数的连续最优求解。精确匹配在模糊匹配的基础上设定判定约束，定义了4个判定函数，4个判定函数相应的权重为（15000，0.27，2，1）。具体的判定约束如下：

（1）关节中心约束：匹配后的关节点必须接近模型的中心。在骨骼上取 10个样本点，设是到最近的模型骨架采样点的距离，是到模型边界的距离，10个样本点的平均值为，则

 (4-5) (4-6)

如果关节点不接近模型中心，取判定值为。

（2）骨骼比例约束：匹配后的骨架上，各段骨骼比例应该与原始骨架模板的相应骨骼比例保持一致。设一个骨骼两端的关节点位置为，而在原始骨架模板上相对应的关节点的位置为。如果两个对应骨骼在整个骨架中的比例不一致，则判定值为：

 (4-7)

（3）骨骼方向约束：设匹配骨骼两端关节点位置为，而在原始骨架模板上相应关节点的位置为。设是向量与的夹角，如果是正的，判定值为；如果是负的，判定值为。

（4）骨骼对称性约束：根据身体中轴对称的骨骼，匹配之后也应当相互对称。设一个骨骼两端的关节点位置为，和它相对称的关节点为。两端骨骼与应根据中轴对称，如果不符合，则有判定值为：

 (4-8)

定义精确匹配的判定函数后，需要对问题进行求解。设每个约束条件相应的判定函数为，是一个不对称性的一个判定函数，代表关节的父节点序号。如果存在关节点，不满足关节中心约束、骨骼比例约束或骨骼方向约束，则有判定函数

 (4-9)

设不同判定的权重分别，则它的总判定值为：

 (4-10)

通过对公式(4-10)的计算的到精确匹配的结果。判定函数求解过程，从某个给定起始点开始计算，并沿着给定优化方向采用单步长搜索。如果总判定值增大，则在梯度方向上采用双步长搜索，重复数次后达到熟练。

图4-7为对两个模型骨架进行精确匹配后的结果，可以看到模糊匹配后匹配不精确的关节点位置已经得到修正。模型骨架上各个关节点，更加符合原始骨架模板相应位置，对应的关节点方向和骨骼比例相互一致。并且，模型骨架上的关节点都位于模型中心位置，可以很好的表示各个模型关节，对于以后模型的运动变形，提供了控制依据。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图4-7 精确匹配后输出的骨架 | |

## 4.4 三维模型的皮肤变形

三维模型驱动根据运动数据信息，通过模型骨架关节点来控制模型各个部位的位置及方向变化，实现三维模型的运动。整个过程的关键，就是由模型骨架关节点控制的三维模型皮肤变形。三维模型的表面被称为模型皮肤，它由模型表面上的顶点、三角面片以及纹理贴图组成。皮肤顶点位置和方向的变化，带动整体模型皮肤变形。模型表面上顶点的数量，根据模型的复杂程度有多有少，但都远远超出模型骨架关节点的数量。通过有限的几个关节点来控制模型皮肤上的所有顶点位置和方向的变化，可以实现对模型皮肤的整体考虑，不必对每一个顶点变化都做出判断，从而方便对模型皮肤变形的控制，提高模型驱动的效率。

实现模型的皮肤变形，必须在模型顶点与骨架关节点之间建立有效地关联关系，将骨架的运动有效地传递到模型皮肤的每个顶点。这一点，如同人体本身骨骼对肌肉和皮肤的运动控制，皮肤和骨骼是绑定在一起的，皮肤随着关节的旋转而发生变形。作为模型驱动的难点技术，模型皮肤变形必须要克服两方面因素：

一、骨架关节点与模型皮肤的绑定：要做到十几个关节点对所有皮肤顶点的运动控制，必须通过建立空间映射关系，将骨骼与皮肤绑定在一起。骨骼的运动带动模型皮肤的运动，而且在模型运动过程中始终保持骨骼在模型的中心位置。人眼对人体运动非常敏感，很容易发现模型皮肤变形的失真。因此，合理有效的绑定方法对皮肤变形效果非常重要。

二、关节点皮肤变形：通过骨架关节点与模型皮肤的绑定，模型皮肤依附在临近的骨骼上。模型运动过程中，模型皮肤根据各段骨骼运动产生相应变形。而对皮肤变形分析后不难看出，依附在同一块骨骼上的皮肤在运动过程中基本保持一定的形状，它会随骨骼的运动一同发生位置和方向的运动，但不会发生相对的皮肤扭曲和变形。只有在关节处的皮肤，由于关节点旋转造成皮肤的拉伸和收缩，产生明显的皮肤变形。

所以，模型皮肤变形，不能简单得视为模型各个部分皮肤变形的叠加，必须考虑整个骨架对模型的影响。基于模型骨架控制的皮肤变形，既要实现模型驱动，又保证了模型的完整性，实现计算机图形学对生物力学的模拟。

本章内容考虑皮肤变形的具体要求，首先对各种皮肤变形技术进行了概述，主要介绍了简单蒙皮算法的插值改进（LBS）算法，LBS算法在皮肤变形中有很广泛的应用。经过对实际问题的分析，本文采用了改进的LBS方法，设定权重分配算法来根据表面点到相应关节的位置分配权重，并通过模拟热平衡效应来分配骨骼权重，最终实现逼真的皮肤变形效果。

### 4.4.1 皮肤变形简介

在皮肤变形的早期应用中，主要采用刚性变形方法。当时的三维模型由多个相互独立的身体部分组成，每个部分的皮肤由一个刚性多边形网格组成，而网格皮肤固定在相应骨架上面。网格皮肤通过空间映射方式与骨骼相互关联，并随着骨架一起产生刚性运动。刚性皮肤变形方法，对计算机资源要求不高，可以快速实现模型皮肤运动变形。但是这种方法的应用只限于各部分相互独立的三维模型，不能体现出三维模型整体运动效果。而且，由于皮肤变形为刚性变化，模型运动生硬真实感较差。

随着三维动画技术的发展，刚性变形渐渐地无法满足人们对于动画细节的要求，新的皮肤变形方法逐渐出现。局部表面算子法就是较早的非刚体皮肤变形方法，通过使用关于关节点的连续变形函数，解决三维模型刚性皮肤变形的绝大多数问题。Thalmann等人[42,43]首先引入基于关节的局部变形算子(joint dependent local deformation, JLD)的概念，通过这些JLD 算子控制模型皮肤的变形，算子本身的值是所有定义算子的关节角度的函数。Komatsu[44]提出由4次Bézier曲面定义出各部分模型皮肤，并将其与各段骨骼相对应起来，根据关节角度的调整来控制模型皮肤变形，使皮肤产生弯曲、扭曲和拉伸等效果。

局部变形方法自身的局限性无法避免，它需要对模型各个部分进行单独设计与计算，从而失去了将模型整体对待进行皮肤变形的意义。针对整个模型皮肤的变形算法浮出水面，骨架子空间变形(sub-space deformation, SSD)，是一种经典的皮肤变形方法。不同于早期的局部表面算子法，SDD是一种插值方法，可以满足各种类型的关节变形，并可以方便地对于变形进行完全控制。Lewis等[45]提出姿态空间变形( Pose Space Deformation, PSD)算法，PSD是插值方法的典型代表，它将几种类型的变形都统一地看作是底层骨架或者其他抽象的参数构成的姿态空间，向皮肤所在子空间的偏移的映射。Zhou[46]提出的基于实体的皮肤变形是两种比较经典的方法。但这些方法都需要手工交互并且对于中等质量的模型并不满足实时性的要求。

Lander[47]提出了的线性混合皮肤变形技术(linear blending skinning, LBS)的表面变形方法，由于其较快的变形速度和丰富的控制资源而成为目前常用的皮肤变形方法。LBS算法仍然存在一些缺陷，如关节处扭转变形、肩膀处塌陷等问题。针对存在的问题，此后大量的文章对其不足进行了改进，如Katz[36]等采用导入大量模型进行计算，最后得出模型结构，进而改进了LBS的方法。但是现有的方法不适合只有用户给定的单一模型的情况。LBS算法被广泛用于各种模型的皮肤变形中。

### 4.4.2 LBS算法

LBS算法是简单蒙皮算法的插值改进。在简单蒙皮算法中，每个关节在世界坐标系中的位置和方向用一个齐次矩阵标识，对于关节，使用表示关节在骨架中的位置，将从根节点到关节点的位置矩阵依次相乘即可得到关节的位置。

为了实现皮肤变形，还需要一个表示关节点在动画过程中的位置和方向的矩阵来驱动网格顶点。假设表示关节点在动画过程中的位置和方向。的计算方法和是相似的，通过从跟节点到关节点的旋转矩阵一次相乘得到。

最简单的蒙皮变形算法使用如下方程计算：

 (4-11)

式中是与顶点相关的模型网格上的顶点，是变换后的顶点，是将变换到顶点的局部坐标系，实现对坐标系的控制。由于这两个变换总是同时发生，因此记为

 (4-12)

LBS是一种插值方法，可以满足各种类型的关节变形，对于变形的控制也完全由建模人员确定，允许多根骨骼对同一个顶点进行控制。在LBS算法中，首先要给模型的每一个顶点关联一组关节，称为影响关节，并设定相应的权重。动画中每一帧中的某一皮肤顶点的新位置就表示为影响关节变换的加权组合：

 (4-13)

其中是权重，对应各个影响关节对改顶点的影响程度，依据公式(4-13)，根据骨架运动，即关节的动态运动可以计算得到皮肤顶点的新位置，这样便可以模拟人体关节运动中皮肤的变形。下图是简单蒙皮变形和LBS算法的比较[48]。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 简单的蒙皮变形 | LBS算法的蒙皮变形 |
| 图 4-8 简单蒙皮变形和LBS算法的比较 | |
|  | |

LBS技术简单，执行速度快且效果较好，视频游戏和电影制作中常采用这种方法。但LBS方法也存在一定的局限性：首先，指定各控制点的权值冗长乏味，要得到满意的变形效果需要大量手工操作；其次，对于一些相当灵活的身体区域， 例如肩膀，某些骨架姿态下的变形严重失真。产生问题的原因是某些期望的变形结果并不一定存在于骨架局部坐标系所定义的子空间中，所以无论怎么改变蒙皮的权值参数，也无法得到满意的结果。尽管LBS具有上述缺陷，但由于该方法简单有效，所以在皮肤变形领域得到了广泛使用，已经是三维建模软件中成熟的算法之一。

### 4.4.3 基于热平衡的LBS权重分配算法

皮肤变形中，皮肤顶点的权重分配对LBS算法效果影响较大。通常情况权重的分配通过实验使用手工完成，工作较为复杂。而且简单的按照刚体性质分配权重，则在关节处的皮肤变形效果显得很不自然，必须对骨骼权重分配进行调整。基于热平衡的LBS权重分配算法可以很好地解决骨骼间权重的分配问题[49]。

首先把模型看作为一个绝缘的热导体。加热骨骼，使它的温度升到1，同时保持其他的骨骼温度为0，当热平衡后，把在这个表面上的每一个顶点的平衡温度作为骨骼在这个顶点上的权重。平衡公式如下：

 (4-14)

  (4-15)

 (4-16)

其中是离散表面拉普拉斯算子，可由Meyer[50]计算。是一个向量，如果顶点的最近的骨骼是，，否则。是一个对角矩阵是顶点对最近的骨骼的热权值。设是顶点到最近骨骼的距离，一般，是骨骼总数。当确定等式因子后，代入得到每个骨骼的权重。令代表顶点的坐标，是骨骼的变换矩阵，而是骨骼对于顶点的权重，那么为顶点变换后的新坐标，加载运动数据更新皮肤顶点坐标，实现皮肤变形。

经过热平衡的LBS权重分配算法实现的皮肤变形，保留传统LBS变形速度快的特点，同时骨骼权重分配更贴近自然，消除关节处皮肤的塌陷，使皮肤变形效果更加逼真。

## 4.5 三维模型驱动实验

由图4-9(a)显示本文使用少量关节标记点及辅助标记点，减少了标记点间相互遮挡和相互影响；图4-9(b)为捕获的原始数据，数据中仅包含骨架中各个关节点的位置信息，没有体现关节的旋转变化；图4-9 (c)、(d)是转换后的模型驱动数据，进行模型驱动的效果，图中显示出模型各主要关节旋转方位。从两个不同模型运动姿态可以看出，将转换后的模型驱动数据加载到三维模型，可以实现较好的皮肤变形及驱动效果。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| (a) | (b) | (c) | (d) |

图4-9：(a)实验设置的关节标记点及辅助标记点；(b)原始三维运动数据；

(c)、 (d)转换后的模型驱动数据，进行模型驱动效果

## 4.6小结

本章针对基于运动捕获数据的三维模型驱动技术，进行了全面介绍和分析。提出了三维模型骨架自动提取及关节点自动匹配方法，快速准确地将运动数据与三维模型进行绑定。进一步对模型驱动中的皮肤变形方法进行了总结，并提出基于热平衡的权重自动分配的改进LBS算法，进行皮肤变形计算，有效地实现了基于运动捕获数据的三维模型驱动。模型驱动效果细致、动作逼真，从而对三维动画制作效率的提高有很大帮助。

# 第五章 实验系统环境

## 5.1 引言

本章首先对实验环境软、硬件框架进行了介绍，然后根据前面几章的叙述，进行了目标三维运动信息提取和模型驱动实验。通过对实验结果的分析，验证了算法的有效性，最后对实验过程进行了小结。

## 5.2 系统硬件环境

系统硬件主要包括三大部分：

（1）16台高帧率工业摄像机，用于运动视频的采集；

（2）4组机柜，共包括16台高性能PC，用于数据的保存和处理；

（3）一个同步控制器，用于对16台摄像机进行同步控制。

16台PC与16台摄像机是相互对应的，每台PC通过1394数据线与相应摄像机相连，用于保存摄像机采集的视频数据。同步控制器通过网线与16台摄像机相连，利用阶跃信号同步控制摄像机的采集工作。16台PC由交换机连接组成局域网，便于对多路视频数据的处理。系统组成结构及实验设备如图5-1所示。

实验环境的搭建，位于一个面积约为7m X 7m的室内。整个实验环境被分为两个区域：表演区域和操作区域。表演区域为表演者表演动作的区域，由黑色幕布包围，四周环侍16台摄像机，用来对区域中心的表演者的运动进行捕获。操作区域位于幕布之外，实验人员通过对PC和同步控制器的操作，控制整个实验过程。同时，机柜里的显示器和切换器可以方便用户对运动捕获实验进行监视。采集得到的数据先是保存在本地PC上，采集操作结束后，再将其从本地PC中取出，在数据处理PC上进行算法流程运算。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| (a) 系统组成结构图 | | | |
| DSC02781 | 4机柜正面04 | DSC02784 | snapshot20090319160922 |
| (b) 摄像机 | (c) 机柜 | (d)同步控制器 | (e) 表演区域及表演者 |
| 图 5-1 运动捕获系统的硬件环境 | | | |

## 5.3 系统软件平台

系统软件平台的设计采用Visual Studio作为开发环境， 各模块的设计开发主要是Visual C++。在开发过程中，使用了外部提供的库函数，如MATLAB、OpenCV、OpenGL 等。

系统软件包括：运动数据转换软件和三维模型驱动软件。

### 5.3.1 运动数据转换软件

软件对原始运动数据进行处理，自动完成运动数据规整和转换，生成BVH格式标准运动数据。软件可以通过棍状图形式对原始运动数据的三维结构进行展示，并支持用户以任意视角观看，软件运行界面如图5-2所示。



图 5-2 运动数据转换软件运行界面图

### 5.3.2 三维模型驱动软件

软件自动对三维模型进行骨架及关节点提取，利用转换后的运动数据（也可以是其他标准运动数据）与模型骨架进行绑定，最终实现三维模型的运动驱动。模型运动完全根据运动数据进行，运动过程中模型皮肤发生由骨架关节点带动，实现相应的皮肤变形，软件运行界面如图5-3所示。



图 5-3 三维模型驱动软件运行界面图

## 5.4 小结

本章针对目标运动信息提取及三维模型驱动，设计并实现了基于标记点的多摄像机运动捕获系统。本章详细介绍了系统的实验环境，包括系统硬件环境以及系统软件平台，并根据要求进行了实验。通过相关实验验证了系统的稳定性以及算法的可行性。总而言之，本系统可以完全满足用户对于运动捕获，以及基于运动数据的计算机三维动画制作的需求，从而提高媒体制作效率。

# 第六章 总结与展望

6.1 总结

本文在重点研究了目标三维运动信息提取及模型驱动。实现了基于运动捕获原始数据的规整和转换，并利用转换后的标准运动数据对三维模型进行驱动。

本文的主要工作和研究成果可以归结为以下几个方面：

1．通过运动数据规整对原始运动捕获数据进行分析处理，优化关节位置，统一骨骼长度，并对运动序列进行平滑，减少因系统运行及实验过程产生的误差。运动数据规整使运动数据中包含的信息更加完整和准确，可以满足模型驱动及其他应用的需要。

2．研究和实现了运动数据转换。通过方向角求解、欧拉角计算从原始运动数据中恢复出完整的运动信息，并以统一的文件结构对运动数据进行保存。将规整后的数据转换成具有标准格式的运动数据文件，以实现运动捕获结果的发布。标准格式运动数据可以应用在其它专业模型动画制作软件上，产生逼真的三维动画效果。

3．对基于运动捕获数据的三维模型驱动展开了研究。分析了当前主要的模型驱动方法，实现整个模型骨架提取和关节点匹配过程的自动化方法。给出基于热平衡的LBS权重分配方法，使之既能保持LBS算法的实时性和易用性，又可以得到过渡均匀的权重，实现较好的皮肤变形效果。最终达到逼真细致的模型驱动效果。

6.2 展望

本文在目标三维运动信息提取及模型驱动技术方面进行了相关研究，在一定程度上解决了存在的问题。但由于该领域的应用背景和所涉及的研究内容十分广泛，因此还存在许多不足之处有待改进：

1．运动信息提取方面

基于视觉的运动捕获技术的可以得到精确地目标空间位置。但是目标身上设置的标记点仅包含空间位置信息，缺乏方向旋转信息，需要通过运动数据转换恢复运动信息。因此需要引入一些辅助标记点，来辅助确定关节点的方向。较多的辅助标记点，给关节标记点的识别带来障碍，并造成系统资源额外耗费。所以将来需要考虑采用特殊标记点，在运动捕获通知直接确定关节点的方向，从而减少误差。

2．模型驱动技术的改进

本文改进了传统LBS算法的权重分配方法实现模型驱动的皮肤变形。保持LBS算法的实时性和易用性，可以得到过渡均匀的权重，实现较好的皮肤变形效果。但是使用LBS算法无论怎么改变蒙皮的权值参数，当某些期望的变形结果并不一定存在于骨架局部坐标系所定义的子空间中，也无法得到满意的结果。所以将来考虑使用球形差值算法或者交叉网格的皮肤变形方法。

在今后的工作中，将针对以上问题做进一步的研究探讨，提高系统的性能，扩展其功能以及应用。总之，在对目标三维运动信息提取及模型驱动技术方面，仍有许多问题值得我们进一步研究，对于媒体制作效率的提高大有益处。

# 参考文献

1. Thomas B. Moeslund, Adrian Hilton, Volker Kruger. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis[J]. Computer Vision and Image Understanding 104 (2006):90–126.
2. King B. A., Paulson L. D. Motion Capture Moves into New Realms [J]. IEEE Computer Society, 2007, 40(9): 13-16.
3. M Müller, T Röder, M Clausen. Efficient content-based retrieval of motion capture data. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, Volume 24, Issue 3, Pages: 677 – 685
4. M. Mizuguchi, J. Buchanan, T. Calvert. Data driven motion transitions for interactive games[C]. In Eurographics 2001 Short Presentations,2001:165-173
5. vicon motion system. http://www.vicon.com/
6. Motion alysis systems. http://www.motionanalysis.com
7. Jehee Lee, Jinxiang Chai, Paul S.A.Reitsma. Interactive Control of Avatars Animated with Human Motion Data. Proceedings of SIGGRAPH 2002, San Antonio, Texas, 2002:491-500
8. Marek Teichmann, Seth Teller. Assisted articulation of closed polygonal models [J]. In Computer Animation and Simulation’98:87-102.
9. Dekker L, Douros I, Buxton BF, Building symbolic information for 3D human body modeling from range data,In: Proc. of the 2nd Int’l Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling[M], Ottawa: IEEE Computer Society, 1999 , 388-397,
10. 庄越挺, 刘小明, 潘云鹤等, 运动图像序列的人体三维运动骨架重建, 计算机辅助设计与图形学学报, 2004 , 12(4):245-250
11. Ju Xiangyang, Siebert JP. Individualising human animation models. In: Proc. of the Eurographics, Manchester, 2001
12. 杨长水, 王兆其, 高文等. 一种个性化虚拟人体模型骨架生成方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(1): 67-72
13. 胡晓雁, 梁晓辉. 自动匹配虚拟人模型与运动数据. Journal of Software, October 2006, Vol 17, No.10, pp.2181-21
14. L Kavan, J Zara, Real time skin deformation with bones blending, WSCG Short Papers Proceedings, 2003
15. 李艳, 王兆其, 毛天露, 三维虚拟人皮肤变形技术分类及方法研究, 计算机研究与发展,2005, 42 (5) : 888-896
16. Boulic R, Thalmann D, Combined direct and inverse kinematic control for articulated figure motion editing, Computer Graphics Forum, 1992, 11 (4): 189-202.
17. 罗忠祥, 庄越挺, 刘丰等, 基于时空约束的运动编辑和运动重定向, 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, Vol.14,No. 12
18. R. N. Bindiganavale. Building parameterized action representations from observation [PhD thesis]. Pennsylvania, University of Pennsylvania, 2000.
19. A. Bachem and W. Kern. Linear Programming Duality: An Introdution to Oriented Matroids. Universitext. Springer-Verlag, 1992
20. Dmitris Alevras, Manfred W. Padberg. Linear Optimization and Extensions: Problems and Extensions, Universitext. Springer-Verlag, 2001
21. Lander Jeff. Working With motion capture file formats[A].In Proeeedings of Game Developers Conferenee，San Jose Convention Center，1998.
22. M Meredith, S Maddock. Motion Capture File Formats Explained. Department of Computer Science, University of Sheffield, 2000.
23. Jehee Lee, Sung Yong Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, NY, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, 1999: 39-48.
24. PPJ Sloan, CF Rose III, MF Cohen. Shape by example. In Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, ACM Press, 135–143.
25. J Cameron, J Lasenby. A Real-Time Sequential Algorithm for Human Joint Localization. ACM SIGGRAPH 2005 Posters, 2005
26. R Pio , Euler angle transformations[C]. - IEEE Transactions on Automatic Control, 1966
27. AR Karduna, PW McClure, LA Michener, Scapular kinematics: effects of altering the Euler angle sequence of rotations [J]. Journal of Biomechanics, 2000.
28. L. C. Biedenharn, J. D. Louck, Angular Momentum in Quantum Physics, Addison-Wesley, Reading, MA, 1981.
29. Jack B. Kuipers. Quaternions and Rotation Sequences. Coral Press, Sofia 2000, pp 127-143
30. James C. Thompson, Michele Clarke, Tennille Stewart, Aina Puce. Configural Processing of Biological Motion in Human Superior Temporal Sulcus. The Journal of Neuroscience, September 28, 2005, 25(39):9059-9066
31. VB Zordan, A Majkowska, B Chiu. Dynamic response for motion capture animation. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, Volume 24, Issue 3, 697 – 701.
32. CKF So, G Baciu. Entropy-based motion extraction for motion capture animation. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005
33. Kavan L, Collins S, Zara J, O’Sullivan C. Geometric skinning with approximate dual quaternion blending. ACM Trans Graph, 2008, 27, 4, Article 105, 23 pages.
34. S Park Il, JK Hodgins, 2008[C]. Data-driven modeling of skin and muscle deformation. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques ACM SIGGRAPH 2008 papers Article No. 96
35. Wade, Fast Fully-Automated Generation of Control Skeletons for Use in Animation, Proceedings of the Computer Animation, 2000
36. Sagi Katz, Ayellet Tal, Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts, ACM Transactions on Graphics, 2003, 22, 3, 954-961
37. Yaron Lip, Linear rotation-variant coordinates for meshes, ACM Transactions on Graphics, 2005, 24, 3,(Aug.),479-487.
38. Kun Zhou, Jin Huang, John Snyder, Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian, ACM Transaction on Graphics, 2005, 24,3(Aug),496-503
39. Frisken, Perry, Rockwood, Adaptively sampled distance fields: A general representation of shape for computer graphics, In Proceedings ACM SIGGRAPH 2000, Annual Conference Series, 249-254.
40. Yizhou Yu, Kun Zhou, Dong Xu, Mesh editing with poisson based gradient field manipulation, ACM Transactions on Graphics, 2004, 23, 3 (Aug.),644-651.
41. Baran, Jovan Popovic, Automatic Rigging and Animation of 3D Characters, ACM SIGGRAPH conference, 2007
42. W. Lee, J. Gu, N. Magnenat-Thalmann. Generating animatable 3D virtual humans from photographs. Computer Graphics Forum , 2000, 19 (3) : 1～10
43. N. Magnenat-Thalmann, R. Laperriere, D. Thalmann. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping. In: Proc. Graphics, 19881 26～331 K1 Komatsu1 Human skin model capable of natural shape varia2tion1 The Visual Computer , 1988 , 3 (5) : 265～271
44. K. Komatsu. Human skin model capable of natural shape variation. The Visual Computer, 1988, 3(5): 265～271
45. J. P. Lewis, M. Cordner, N. Fong. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In: Proc. SIGGRAPH2000, 2000.
46. Kun Zhou, Jin Huang, John Snyder, Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian, ACM Transaction on Graphics, 2005, 24,3(Aug),496-503
47. Jeff Lander, Skin them bones: Game programming for the web generation, Game Developer Magazine , May 1998, 11-16
48. Jason Weber, RunTime Skin Deformation, Intel Architecture Labs <http://www.intel.com/ial/3dsoftware/index.htm>
49. Ladislav Kavan, Steven Collins, Carol O'Sullivan.Automatic linearization of nonlinear skinning [C]. Symposium on Interactive 3D Graphics Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games, 2009, Pages 49-56.
50. Mark Meyer, Mathieu Desbrun, Peter Schroder, Discrete differential geometry operators for triangulated 2-manifolds, In Visualization and Mathematics III. Springer Verlag, Heidelberg, 2003, 35-57.

# 硕士期间参加的科研项目及发表的论文

## 1、科研工作

1. 2009.8 – 至今 陕西省电子配套基金项目，研究与实现运动捕获系统的工程应用，实现运动捕获系统结果直接用于三维动画及游戏制作，项目中主要负责整体软件和硬件平台的搭建与实现。
2. 2008.3- 2009.12 参加国家863项目“提高媒体制作效率的媒体环境真实目标计算技术”，项目中承担的主要工作有运动数据的恢复，三维模型骨骼的提取，三维模型的数据驱动，模型和场景的绘制和显示。
3. 2009.3- 2009.8 热成像仪数据采集系统，采用多线程机制完成长波、中波、短波三部热成像仪同步采集、同步播放，项目中主要负责同步功能的软硬件实现。

## 2、发表论文

1. 第一作者 中国体视学与图像分析, 2009
2. 第一作者 全国信号与信息处理联合学术会议, 2009. 7

## 3、专利及软件著作权

1. 申请专利一项（公示期）
2. 获得软件著作权一项
3. 正在申请软件著作权一项

# 致 谢

衷心感谢我的导师郑江滨教授！本文的工作是在导师郑老师的悉心指导下完成的。从论文选题到具体研究，从资料准备到论文的撰写，郑老师都给予了我真诚的关心、耐心的教诲和热情的鼓励。在研究生的三年时间中，郑老师以渊博的知识、扎实的专业基础、丰富的科研工作经验、严谨的治学态度、饱满的工作热情和勇于开拓的精神都深深影响了我，使我受益良多。在指导我学习的同时，郑老师在生活上还给予了我非常多的帮助和鼓励，使我对今后的人生目标、为人处世有了更深的认识。借此机会，谨向郑老师表示衷心的感谢。

感谢张艳宁教授，她严谨的治学态度和谆谆教人的作风都给我留下深刻的印象，是我学习的榜样。

感谢王庆教授，他广博的知识，对计算机理论和技术深邃的理解以及独具匠心的运用常常使我豁然开朗，受益匪浅。

感谢教研室的其他老师赵荣椿教授、李映教授、蒋冬梅副教授、谢磊副教授等在我的学习期间给我的关怀和帮助。正是他们营造出的友爱氛围才能使我将全部精力投入到本文的研究中去

感谢郗润平，林增刚老师对本文实验工作的直接、宝贵的支持。

感谢几年来和我朝夕相处的学科组成员，他们是李秀秀、谷二营、冯莎、刘苗、王天旭、李哲、崔丽洁、陈宁、周跃、韩宝英、雷伍琴。在与他们共事的日子里，我们一起协作克服了许多困难，一起度过了很多愉快的时光，在此，向他们表示衷心的感谢！

深深感谢含辛茹苦养育我，为了我的成长倾注无数心血，付出巨大代价的我的父亲、母亲和所有疼爱我的家人，没有他们在背后的支持和鼓励，就没有我今天的成绩。

最后还要感谢您阅读本文！