

自动匹配虚拟人模型与运动数据*

胡晓雁⁺, 梁晓辉, 赵沁平

(北京航空航天大学 虚拟现实教育部重点实验室, 北京 100083)

Match the Virtual Human Model and Motion Data Automatically

HU Xiao-Yan⁺, LIANG Xiao-Hui, ZHAO Qin-Ping

(Key Laboratory of Virtual Reality, Ministry of Education of China, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-82317646, E-mail: huxy@vrlab.buaa.edu.cn

Hu XY, Liang XH, Zhao QP. Match the virtual human model and motion data automatically. *Journal of Software*, 2006,17(10):2181-2191. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2181.htm>

Abstract: Captured motion data is widely used in virtual human motion control and synthesis. Usually, the motion data has a native skeleton definition. To apply captured motion on virtual human skin model, the model should have an underlying skeleton that matches the one defined by the motion data. This paper proposes an algorithm called LMSA (lazy match based on semantic analysis) which generates skeleton for existing human model and matches it to the motion data when the motion data is loaded. The LMSA algorithm first generates Candidate-Joint-Set for a human model with a group of parallel planes and then applies the same semantic analysis to both the Candidate-Joint-Set and the skeleton of motion data to match them. By using LMSA algorithm, different motion data can be applied to the existing human model directly without predefining skeleton for human model.

Key words: virtual human; joint semantic; skeleton match; motion data; human motion; candidate-joint

摘要: 使用运动数据驱动虚拟人模型运动是人体运动仿真的常用方法,通常,运动数据本身定义了适合该运动数据的骨架结构,这要求被其驱动的虚拟人模型也必须有相匹配的骨架定义。提出了一种推迟到运动数据导入时再为模型生成骨架结构的基于语义分析的懒匹配算法(lazy match based on semantic analysis,简称LMSA),该算法先用一组平行平面切分人体模型以生成备选关节集,并在导入运动数据后对备选关节集和运动数据的骨架结构进行语义分析,匹配具有相同语义的备选关节和骨架结构的各关节,使已有的虚拟人几何模型能够直接应用于具有不同骨架结构的人体运动数据。

关键词: 虚拟人;关节语义;骨架匹配;运动数据;人体运动;备选关节

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

借助运动捕获设备,人们可以获取真实的人体运动数据,并用这些运动数据驱动虚拟人骨架模型重放(replay)被采集的运动。运动数据的存储格式有多种,如BVA,BVH,ASF+AMC,BIP以及各公司和科研机构自定义

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2004AA115130 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2005-08-08; Accepted 2005-10-27

的数据格式等。

运动数据一般分为两个部分,骨架定义部分定义了该运动数据所使用的骨架结构,包括组成该骨架的各关节的坐标、自由度以及各关节相对层次关系;随后的数据部分记录了运动的帧数以及该骨架结构在每一帧时的全局坐标和各关节的关节角.获得运动数据后,可用 Vertex Blending 算法或 PSD^[1]及 FFD^[2]等方法驱动人体几何模型运动与变形.

骨架结构是连接虚拟人几何建模及运动数据的桥梁.动画制作人员一般预先约定本应用中人体骨架结构 (articulated skeleton);然后,分别对人体进行建模和采集运动数据;最后,将运动数据应用到骨架结构并驱动人体几何模型,图 1 给出了这个过程,其中的“模型构建骨架模型”与“运动数据骨架定义”具有相同的结构和语义(见第 1 节).

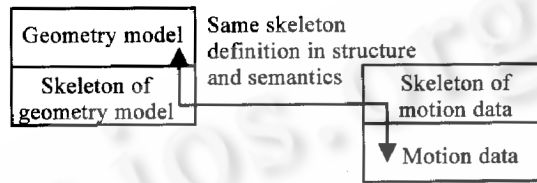


Fig.1 Traditional process in skeleton animation

图1 传统的运动数据匹配方法

由于已建好的人体模型只能使用具有相同骨架结构的运动数据驱动,这使得运动数据应用起来相当麻烦,为了减少人工干预、提高效率,人们开始研究自动匹配人体模型和运动数据的有关技术.

Brett Allen 等人^[3]设定一个人体模型为标准模板,并手工为其构建骨架模型,对于需要生成骨架模型的三维人体扫描模型,通过映射算法将为标准模板构建的骨架模型映射到新模型上去,使得新模型也可以被驱动. Xiangyang^[4]通过将标准模型与三维扫描模型之间的匹配区分为全局映射(global mapping)和局部变形(local deformation),使新模型能被驱动.这些方法只能得到预先构建的骨架结构,并且要求新模型与模板在几何表示、分辨率和姿势上相同. Dekker 等人^[5]以及 Oliveira^[6]在模型表面解析出一系列标记点(landmark),例如,颈部标记点、膝部标记点等,然后借助这些标记点来生成骨架以及表面模型与骨架的对应关系.但是,这些方法在解析标记点时,需要针对人体的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. Teichmann^[7]提出使用 Medial axis 与 Voronoi 图结合的方法^[8]来生成闭合多边形模型(closed polygonal model)的层次骨架结构,但是,这种方法需要交互选择各骨架的关节点作为提示信息,以进一步简化中间结果并最终得到骨架. Lawson^[9]提出用 Euclidean distance map 的方法来获取模型内部的信息,但这种方法需要先把几何模型转换成体素表示(voxelization).这类方法对噪声敏感,并且不考虑人体的结构特征,所得到的中间数据为无序点集,较难对其进行语义解析.对几何模型进行分解是解决骨架自动生成的一类新方法^[10],但这种方法只对模型本身进行分块并进而生成骨架,无法匹配不同骨架结构的运动数据.国内近年来也开展了提取骨架模型的相关研究,杨长水^[11]等人提出的方法对已分块的人体表面模型中各分块之间的关节进行提取并匹配到标准骨架模板上.庄越挺^[12]等人从运动图像序列中重构人体三维运动骨架.

上述大部分现有骨架生成技术主要存在两方面的问题:1) 未对骨架结构和人体模型进行语义分析,需手工标注对应的关节点;2) 没有综合人体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.

为解决上述问题,本文研究并给出了骨架模型中各关节的语义和语义分析方法,并基于此提出可自动匹配运动数据与虚拟人几何模型的基于语义分析的懒匹配算法——LMSA(lazy match based on semantic analysis).

1 骨架关节的语义分析的相关概念

本节首先讨论在几何模型骨架生成及其与运动数据进行匹配的过程中出现的分别来自几何模型和运动数据骨架模型等方面的问题,并由此引出备选关节点集和骨架关节四元组语义等相关概念.

1.1 几何模型的骨架信息和关节字符串语义的不确定性

基于语义分析的懒匹配算法的输入,是虚拟人的几何模型和运动数据的骨架模型.但是,在对虚拟人几何模型生成骨架模型并与运动数据匹配的过程中,几何模型自身的骨架信息存在不确定性.几何模型中一般只包含表面皮肤的信息,并没有明确关节所处的具体位置,因此不能直接使用虚拟人几何模型(也称皮肤、skin)的顶点与骨架模型的关节进行匹配.我们称这一问题为“几何模型骨架信息的不确定性”.

而在骨架模型中,也相应存在着“关节字符串语义的不确定性”.在角色动画或虚拟人仿真中,骨架模型一般会对每个关节命名,以指出其所表示的关节.例如,在某骨架模型中,左手的腕关节被命名为“Left Wrist”,我们称该字符串内容为关节字符串语义,记为 *String_Sem*.关节字符串语义能够直观地表达骨架模型中各关节的含义,但在具体实践中字符串语义值的给出有较大的随意性.如前所述,字符串语义值为“Left Wrist”的关节在另一套运动数据中可能被命名为“L Wrist”,我们称这一事实为“关节字符串语义的不确定性”.为解决字符串语义的不确定性,可将关节的语义取值固化,给出一个关节命名标准.不过,这可能使得现有的运动数据仅因关节命名不符合标准而无法使用.

1.2 备选关节和关节的四元组语义

上节提到的两个不确定性是匹配算法必须解决的问题.“几何模型骨架信息的不确定性”实际上是“用什么去匹配?”的问题;而“关节字符串语义的不确定性”则是“根据什么去匹配?”的问题.对于前者,我们对虚拟人几何模型进行预处理,导出一些备选点代替几何模型与运动数据的骨架匹配,并称这些点为备选关节点(见定义 1~定义 3);对于后一个问题,定义人体关节的四元组语义(见定义 4),我们将证明,四元组语义的性质使其适用于判断备选关节点与骨架关节是否匹配.

定义 1(截面). 用一个平面切割人体几何模型,称所得到的闭合曲线为截面.

定义 2(截面集). 当用一组平行平面切割人体几何模型时,得到的所有截面组成的集合称为截面集,用 {Contour} 表示.

定义 3(备选关节点集). 对截面集中每个截面计算几何中心,这些中心称为备选关节点(candidate-joint),备选关节点组成的集合称为备选关节点集,用 {Candidate-Joint-Set} 表示.

上述备选关节点可近似代表几何模型的骨架信息,其生成算法和相关分析将在第 2.2 节给出.

定义 4(人体关节语义). 对于一套人体骨架模型,定义其中关节 *J* 的语义 *Semantics(J)*(或简称 *S(J)*)为一个的四元组: {Orientation, Degree, Distance, MagicNumber} (下文中也称为关节的四元组语义).

定义 4 中关节的四元组语义各分量的具体含义分述如下:

Orientation 指出该关节是处于人体的右面、中间,还是左面(相对于人体朝向而言)的关节链路上.该项取值于{-1,0,1},当处于右面链路上时,取值为-1;处于中段链路上时,取值为 0;若处于左面关节链路上,则取值为 1.图 2 显示了虚拟人骨架模型中各关节的 **Orientation** 属性,其中,灰色的关节链路上的关节 **Orientation** 取值为 1;白色关节链路上的关节 **Orientation** 取值为-1,而中间使用横线填充的关节链路上的各关节 **Orientation** 取值为 0.

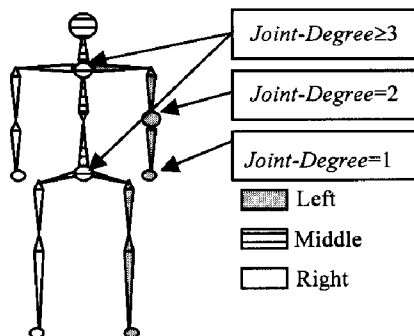


Fig.2 Joint semantics in skeleton of virtual human model

图2 虚拟人骨架模型中各关节语义示意图

Degree 指出该关节在骨架的树结构中的度数,即与几个关节相连.该项取值于正整数,若该关节为叶结点,则取值为 1;其他一般取值为 2,即与父关节和子关节相连;当为髋关节(根关节)或颈关节时,取值为 3 及 4;最后,当为腕关节(踝关节)时,视仿真粒度可能为 2(连接父关节和终端效应器 end effector)或者 6(连接父关节和 5 个指/趾关节),为讨论方便,这里我们只讨论取值为 2 的情况.取值为 6 的情况需要对 *MagicNumber* 计算规则作适当的修改,但讨论过程类似,并不影响对语义的分析.

Distance 是指该关节在所处的关节链路上距根关节的距离,在 $[0,1]$ 取值.若设关节 J_i 处于关节链路 $J_0J_1\dots J_i\dots J_n$,其中 J_0, J_n 分别为该条关节链路上的根关节和叶关节,也就是虚拟人骨架模型中的根关节和终端效应器,则 *Distance* 的计算式如下:

$$Distance = \frac{\sum_{j=1}^i |J_{j-1}J_j|}{\sum_{j=1}^n |J_{j-1}J_j|} \quad (1)$$

MagicNumber 是指关节 J_i 所处关节链路上处于 J_i 之前且度数大于等于 3 的关节的个数,仍设 J_i 所处的关节链路为 $J_0J_1\dots J_i\dots J_n$,则 *MagicNumber* 的计算式为

$$MagicNumber = \sum_{j=0}^i \delta^3(J_j) \quad (2)$$

其中 $\delta^3(J)$ 为示性函数,定义如下

$$\delta^3(J_j) = \begin{cases} 1, & Degree(J) \geq 3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 骨架关节的四元组语义的性质

关于上节所定义的关节四元组语义,我们将给出两个重要的定理,这两个定理保证我们使用骨架关节的语义分析方法可以有效地进行匹配工作.

定理 1. 给定虚拟人骨架模型 *Skeleton*,则其中的各关节的语义是唯一确定的,并且不同的关节其语义也不等,即 $\forall J_i, J_j \in Skeleton, J_i \neq J_j$, 有 $Semantics(J_i) \neq Semantics(J_j)$.

证明:首先,由关节的四元组语义定义和各分量的意义可知,每个关节的语义是唯一确定的.

其次,我们结合图 2 来证明,给定语义 $\langle Orientation, Degree, Distance, MagicNumber \rangle$

$\forall J_i, J_j \in Skeleton, J_i \neq J_j$, 可分如下情况来讨论:

- 1) 依照图 2 对各关节链路染色,若 J_i, J_j 分属不同颜色的关节链路,则其 *Orientation* 属性不等,因此有 $Orientation(J_i) \neq Orientation(J_j) \rightarrow Semantics(J_i) \neq Semantics(J_j)$;
- 2) 当 $Orientation(J_i) = Orientation(J_j)$, 则取值只可能为 $\{-1, 0, 1\}$:
 - a) 首先,如果 $Orientation(J_i) = Orientation(J_j) = 0$, 则表明两个关节均处于中间的关节链路上,此时有 $Distance(J_i) \neq Distance(J_j)$, 命题得证;
 - b) 若 $Orientation(J_i) = Orientation(J_j) = 1$, 则 J_i, J_j 同为灰色,若 J_i, J_j 处于相同的关节链路,则如上面的 a), 得到 $Distance(J_i) \neq Distance(J_j)$; 若 J_i, J_j 处于不同的关节链路上,则有 $MagicNumber(J_i) \neq MagicNumber(J_j)$, 即有 $Semantics(J_i) \neq Semantics(J_j)$. 得证;
 - c) $Orientation(J_i) = Orientation(J_j) = -1$, 由人体对称性可知,与 b) 的讨论相同,得证. \square

由定理 1 可知,对于给定的一套虚拟人骨架模型,其上各个关节的四元组语义是具有确定值的,并被唯一地赋予相应关节.这使得四元组语义更易于存储、计算并判断是否相等,从而避免了对骨架模型使用字符串语义而导致的前述“关节字符串语义的不确定性”问题.关节的四元组语义存在不够直观的缺点,不过可以通过映射将关节的两种语义对应起来.下面的定理表明,关节的四元组语义可以和“非病态”的字符串语义建立一一映射的关系.所谓“非病态”的字符串语义是指骨架模型中任意两个关节的字符串语义不相等.一般运动数据的骨架定义中除去终端效应器,各关节的字符串语义是满足“非病态”要求的,而对终端效应器的字符串语义 $String_E$ 取值相等的情况,可将其字符串语义定义为与父关节字符串语义的联合,即 $String_E = String_E + String_{Parent}$.

定理 2. 对于给定的一套虚拟人骨架模型 *Skeleton* 及其各关节语义的字符串描述 $String_Sem(Skeleton)$, 关

节的四元组语义 $Semantics(Skeleton)$ 与字符串语义之间存在一一映射的关系,即 $\exists f$,使得 $f:Semantics(Skeleton) \rightarrow String_Sem(Skeleton)$ 为一一映射(其中, $String_Sem(Skeleton)$ 和 $Semantics(Skeleton)$ 分别表示骨架 $Skeleton$ 中所有关节的相应语义的集合).

证明:使用构造法证明.对于给定的骨架模型 $Skeleton$ 及字符串语义 $String_Sem(Skeleton)$,对每个关节 $J \in Skeleton$,计算其语义 $Semantics(J)$,令映射 $f:Semantics(J) \rightarrow String_Sem(J)$,则 f 将 $Skeleton$ 所有关节的四元组语义组成的集合 $Semantics(Skeleton)$ 映射到了相应的字符串语义描述集合 $String_Sem(Skeleton)$.

下面证明 f 为一一映射,即证明 f 既是单射又是满射.

由于每个关节 J 均有一个四元组语义 $Semantics(J)$ 和一个字符串语义 $String_Sem(J)$,故 f 是满射;又由定理 1, $\forall J_i, J_j \in Skeleton, J_i \neq J_j$, 有 $Semantics(J_i) \neq Semantics(J_j)$. 同时,因 $J_i \neq J_j$, 故其字符串语义描述也不同. 所以, f 是单射; 综上, f 既单且满, 即为从 $Semantics(Skeleton)$ 到 $String_Sem(Skeleton)$ 的一一映射. \square

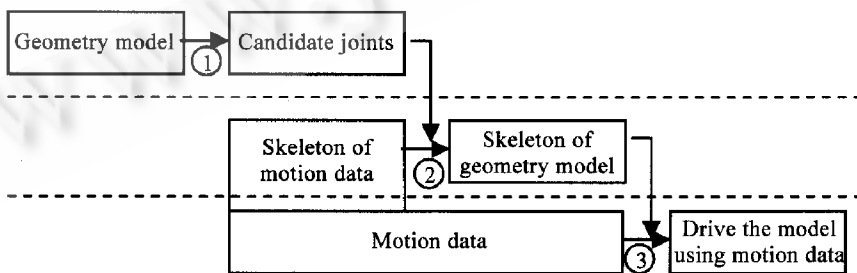
定理 2 表明,对于一套带有字符串语义的骨架模型,我们可以为其各关节计算四元组语义,然后在关节的四元组语义和字符串语义之间建立一一对应的关系. 如此,综合后的关节语义既有四元组语义的易于存储和计算的特性,又具有直观性.

四元组语义的唯一性使得我们能方便地完成几何模型与(运动数据定义的)骨架结构的匹配工作.在这种情况下,只需分别计算出骨架结构的关节集合和虚拟人几何模型的备选关节点集合(在下一节中给出)各元素的语义值.由定理 1 可知,若两关节的语义值相等,则这两个关节必相等.因此,对骨架结构中的每个关节,在备选关节点集合中搜索语义值与之相等或最接近的备选关节点进行匹配即可.

2 基于语义分析的懒匹配算法——LMSA

2.1 LMSA算法概述

根据人体关节语义的定义及其性质,我们便可在在此基础上对骨架模型和备选关节点集进行语义分析和匹配,这就是“基于语义分析的懒匹配算法”.如图3所示,LMSA 算法将从构建骨架到驱动虚拟人模型运动的过程分为 3 个阶段,分别用虚线划分,在箭头处的标号分别是各阶段发生的时机.首先,导入几何模型,对模型等距取截面生成备选关节点集;其次,在导入运动数据之后,为骨架结构中各关节在备选关节点集中找到语义相匹配的备选关节点,并用这些点的坐标信息替换关节点的坐标信息,这样生成的骨架层次结构同时具有运动数据的骨架结构和人体模型骨架的坐标信息;最后,将运动数据应用于生成好的骨架结构以驱动人体模型运动并根据第 2 阶段为皮肤分配的权重和姿态调整信息,产生皮肤变形效果.



① Generate Candidate Joints;② Generate Skeleton;③ Drive virtual human model using motion data

Fig.3 Process of LMSA

图 3 懒匹配算法处理流程

下面给出了 LMSA 算法的伪代码描述:

算法 1. 基于语义分析的懒匹配算法——LMSA.

PROCEDURE LMSA

GENERATE ({Candidate-Joint-Set}) // I

```

FITTING ({Candidate-Joint-Set})           // II
// after the Motion Data loaded
SEMANTIC_ANALYSIS(Skeleton,{Candidate-Joint-Set})
                                           // III
MATCH (Skeleton,{Candidate-Joint-Set})    // IV
ATTACH (Model,Skeleton)                   // V
COMPUTE_TRANS (Model,Skeleton)            // VI
END

```

LSMA 算法对人体模型和运动数据骨架模型分别处理:1) 对人体几何模型,算法进行预处理,生成备选关节节点(GENERATE)和以备选关节节点描述的骨架结构(FITTING),并分别计算各备选关节节点的语义.这部分可以离线完成;2) 对运动数据骨架模型,计算各关节的语义(SEMANTIC_ANALYSIS).至此,就可以对各关节选择语义相同的备选关节节点进行匹配(MATCH)及其他处理(ATTACH,COMPUTE_TRANS).

2.2 数据准备——备选关节节点集的生成

在构造备选关节节点集之前,我们做如下假设:

假设 1. 人体模型的姿势只有如图 4(a)所示的 H(horizontal)型和图 4(b)中的 V(vertical)型,大多数构建好的人体模型都符合这两种姿势.当然,这其中隐含了人体模型初始姿势是左右对称的假设.

假设 2. 假定 Y 轴沿人体竖直从脚踝到头顶方向, Z 轴与人体朝向平行.

我们用一组等间距的平行平面对人体模型进行相交测试(扫描),进而计算备选关节节点集.在图 5 中,平面截取人体模型得到若干闭合曲线,其中心点即为备选关节节点.而后文中的图 7(c)给出了用一组平行平面截取后所得的备选关节节点集.对于 V 型的人体模型,只需要一组平行于 XZ 平面的平面系,而对于 H 型人体模型,还需要额外的一组平行于 YZ 平面的平面系(这组平面截出的备选关节节点是按照 X 坐标排序的,后面相关叙述中对这些备选关节节点需相应地以其 X 坐标为讨论对象,或将这些备选关节节点旋转 90° ,以使用 Y 坐标描述.本文仅对 V 型人体模型加以讨论).由于人体几何模型由三角面片组成,因此,用平面截取模型得到的是平面与这些三角面片的相交线段集,我们需要将这些线段连接起来,然后再计算相应的备选关节节点.具体算法见算法 2.

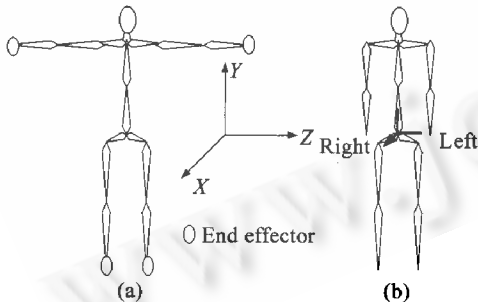


Fig.4 Two typical poses of human model
图 4 两种典型的人体模型姿势

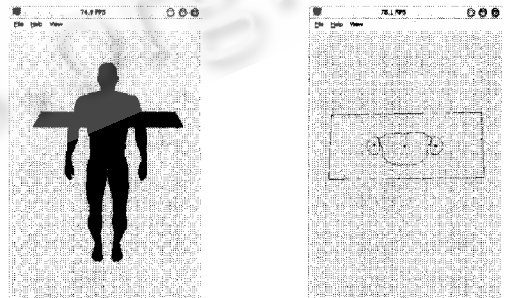


Fig.5 Parallel cutting and Candidate Joints
图 5 平面截取与备选关节点

算法 2. 备选关节节点集生成算法——GENERATE.

```

PROCEDURE GENERATE ({Candidate-Joint-Set})
{Candidate-Joint-Set}=∅
FOR EVERY Plane i
  Intersect=INTERSECTION(Plane i,Model)
  Contour=CONTOUR(Intersect)
  Cjoints=GEN_CJOINTS(Contour)

```

```

ADD_CJ({Candidate-Joint-Set},Cjoints)
END FOR
END

```

在算法 2 中,对平行平面簇中的每个平面,如 *plane i*,INTERSECTION 函数针对几何模型的每个三角面片,测试是否与该平面相交.若相交,则将其相交信息保存至 *Intersect* 中,CONTOUR 函数对 *Intersect* 中的交线段进行连接测试,生成平面截取人体几何模型的轮廓(一般来说,是若干封闭的平面折线,如图 5 右所示);随后,GEN_CJOINTS 函数使用式(4)计算备选关节,并将其添加入备选关节集{Candidate-Joint-Set}中去.

$$Cg = \frac{1}{length} \sum_{i=0}^{length-1} P_i \quad (4)$$

由于 INTERSECTION 函数对三角模型的每个三角面片执行测试,因此循环次数为 $N\Delta$, $N\Delta$ 为模型的三角面片个数.函数 CONTOUR 对与平面确实相交的面片进行处理,因此循环次数小于 $N\Delta$.设有 K 个平面,则算法 2 总共执行 $K \times N\Delta$ 次相交测试,以及不多于 $K \times N\Delta$ 次与轮廓相关的计算,故算法 2 的复杂度为 $O(KN\Delta)$.由于平行平面的个数 K 与需要解析人体关节的细节程度有关,对某一关节(如手指部的关节),其细节程度可由其占人体大小的百分比来定义.若希望解析人体精确到百分之一的细节程度,则相应可取 $K=100$ (常数),此时,算法复杂度变为 $O(N\Delta)$.另外,一般情况下,每一平面只与少量面片相交,可对 CONTOUR 函数加以改进.例如,预先对模型的三角面片按顶点 Y 轴坐标排序,这样,每一平面将只与小范围内的三角面片求交.

2.3 骨架模型中各关节的语义计算

对于骨架模型各关节,由于整个骨架的结构和各关节之间的关系已经明确,因此语义计算较为直观,大部分关节的各语义分量可依据其定义给出.例如:关节 J 的 *Degree* 分量的值为 J 的子关节数加父关节数(0 或 1),而 J 的 *Distance* 分量以及 *MagicNumber* 分量则可根据关节 J 所在的关节链(从根关节到 J 直至某终端效应器的一段链路)来确定.

对于关节的 *Orientation* 属性,我们需要确知人体的朝向,并进一步解出各关节的左、右属性.事实上,人们对自身的左、右判断是以自身所面向的方向(在建模时常常标定为 Z 轴,如图 4 所示)为基准的;一般姿势下,人体重心会稍稍前倾.根据这个事实,我们给出人体朝向的判据,并据此获得模型或骨架关于左、右的信息(也可根据脚部的朝向给出人体朝向判据).我们计算终端效应器集合{end effector}的重心 C (center of end effectors),由假设 1、假设 2 可知,向量 \overrightarrow{OC} 在(或者近似在) YZ 平面上,并且其在 Z 轴上的投影方向为人体模型(或骨架结构)的朝向 Dir ;而对于人自身来说,上面(Y 轴)、前面(dir)、左边($left$)构成了右手系.因此,我们有

$$Left = \vec{y} \times \vec{oc}, \quad Dir = Left \times \vec{y} \quad (5)$$

据此,我们便可以给出每个关节的偏向属性:

$$Orientation(J) = \frac{\overrightarrow{oj} \cdot \overrightarrow{Left}}{|\overrightarrow{oj}| \times |\overrightarrow{Left}|} \quad (6)$$

其中, \overrightarrow{oj} 为关节 J 在根关节所定义的坐标系中的向量.当 \overrightarrow{oj} 与 \overrightarrow{Left} 方向一致时, $Orientation(J)=1$,相反时则为 -1 ;而当二者垂直时为 0.显然,对偏向取 0 的关节, \overrightarrow{oj} 并不严格与 \overrightarrow{Left} 向量垂直.因此,在使用式(6)判断 *Orientation* 取值为 0 时,需要允许一定的误差,即若 $|Orientation(J)| \leq \varepsilon^{Ori}$,则令 $Orientation(J)=0$.

2.4 备选关节集描述的骨架及其语义计算

备选关节没有连接信息,尚无法进行语义分析.根据第 2.3 节中对关节语义计算的讨论,如果能将各备选关节联系起来,初步形成相互连接的骨架,那么就可以用类似的方法计算备选关节的语义,进而完成基于语义的匹配.如果我们能将这些备选关节拟合为若干直线段,则这些直线段就是“骨骼”,将这些“骨骼”连接起来,就形成了骨架.因此,问题转换为将空间中的一些点拟合为若干空间直线段(LMSA 算法中的 FITTING).

将给定三维欧氏空间中的备选关节集{Candidate-Joint-Set},确定 k 条空间直线(段)分别拟合这些点,使得总误差最小.假设拟合出 k 条直线,并且直线 $L_i(i=1, \dots, k)$ 拟合了 n_i 个备选关节,则我们定义误差为

$$\varepsilon(\{\text{Candidate-Joint-Set}\}, k) = \sum_{i=1}^k \sum_{P_j \in L_i} \text{dist}(L_i, P_j) \quad (7)$$

因为我们事先并不知道 k 的值,同时我们需要确定哪些点在哪些直线上,这涉及到对一个非常大的组合空间进行搜索.这里,我们采用 k -均值法求解,即重复下述两个步骤:

- 1) 将每个备选关节点分配给距离最近的直线;
- 2) 对于每条直线分配到的备选关节点子集,拟合最佳的直线.

由于事先并不知道 k 的值,我们首先猜测一个较大的值赋予 k ,并在拟合完成后判断:

- 1) 是否可以合并直线?若是,则合并之, k 减小;
- 2) 是否有拟合误差超出允许阈值的直线?若有,则分裂之, k 增大.如此循环,直至不再发生直线合并和直线分裂,或者循环次数超过预定限制 N_{step} .

在拟合了各关节链的直线方程后,我们可以将各关节链连接起来,以形成用备选关节点描述的虚拟人“骨架”.

- 1) 首先需要确定“根关节”,这只需在所有关节链的端点集合中搜索与人体模型顶点重心最为接近的端点;
- 2) 确定根关节后,将其与各相应关节链连接起来,即初步形成了以备选关节点描述的虚拟人骨架.此时,规定这些关节链上从根关节为起始点进行排序,确定关节链上各备选关节点的顺序,并将这些备选关节点依次连接.

3) 确定根关节所在的拟合直线为人体脊椎所对应的关节链,其上的所有备选关节点的偏向属性 *Orientation* 取值均为 0,并对颈关节根据 *Orientation*, *MagicNumber* 和 *Distance* 语义分量做“不完全”匹配(因为此时尚无法计算颈关节的语义分量 *Degree*),并令颈关节与其他两个对应的关节链路连接.

各备选关节点的 *Orientation* 属性,可按照第 2.3 节对关节 *Orientation* 属性的计算方法进行计算.

至此,已有足够的信息可以对每个备选关节点计算其语义,计算式参见第 1 节的关节语义的定义及计算式,这里不再赘述.

2.5 关节匹配

在导入运动数据后,即可为虚拟人几何模型匹配相应的骨架.该阶段的实质是采用运动数据定义的骨架结构,并用匹配的备选关节点修改其坐标信息.为此,我们对运动数据骨架定义中的各个关节与备选关节点进行语义分析,实现两者自动匹配(值得一提的是,不同大小的角色模型情况下需要进行运动重定向^[11]).具体算法如下:

算法 3. 语义分析及匹配.

```

PROCEDURE SEMANTIC_ANALYSIS_MATCHING
  COMPUTE_SEMANTIC({Skeleton})
  COMPUTE_SEMANTIC({Candidate-Joint-Set})
  FOR EVERY  $J \in \{\text{Skeleton}\}$  DO
    FOR EVERY  $P \in \{\text{Candidate-Joint-Set}\}$  DO
      IF  $S(J) == S(P)$  THEN
        MATCH( $J, P$ )
      ELSE  $\text{NotMatched} = \text{NotMatched} \cup \{J\}$ 
    END FOR
  END FOR
END

```

在算法 3 中, *NotMatched* 包含所有未被匹配上的关节,可根据需要作进一步调整或匹配.算法中包含两个循环:外循环针对运动数据所定义的骨架中的每个关节;而内循环则针对备选关节点试探其语义值是否与当前关节的语义值相等:若相等,则匹配;否则,将当前关节加入未被匹配的关节,在外循环结束后再处理.对于内循环,我们可以做一些优化工作,例如根据不同分量缩小搜索范围,较少内循环次数等.

2.6 将几何模型附着到骨架

当所有关节的坐标被相应的备选关节坐标所替换后,包含模型坐标信息以及运动数据结构信息的骨架也就生成了.为了使用运动数据驱动模型,仍有两个工作要做:一是将骨架与人体几何模型各顶点对应;另一个则是调整初始姿势.

利用截面集,我们可以将模型中所有与某截面相交的三角面片与该截面的备选关节点对应起来.这些面片的顶点可以定义为受该备选关节点所影响,进而也受骨架结构中相应关节的影响,影响权重可依照其与该关节的距离使用一维高斯函数分配并进行归一化处理.该步骤对每个面片的顶点进行处理,因此,复杂度为 $O(N\Delta)$, $N\Delta$ 为模型的三角面片个数.

前述匹配工作只针对骨架的拓扑结构进行匹配.但在空间位置关系方面,人体模型与运动数据的初始姿势可能不一致.对某关节 J , 设 \overrightarrow{OJ} , $\overrightarrow{O'J'}$ 分别为几何模型和运动数据中相对于父关节的偏移向量,则需将 \overrightarrow{OJ} 旋转到与 $\overrightarrow{O'J'}$ 重合,再对其应用运动数据.显然,该旋转的轴应同时垂直于 \overrightarrow{OJ} 及 $\overrightarrow{O'J'}$, 旋转的角度为 \overrightarrow{OJ} 与 $\overrightarrow{O'J'}$ 的夹角,故计算 \overrightarrow{OJ} , $\overrightarrow{O'J'}$ 的叉积和向量积即可得出所需要的旋转.在调整时,为保证调整只对相应关节起作用,应在处理完该关节后施行该旋转的逆变换.

3 实验分析及进一步的工作

3.1 算法分析

我们的方法与现有方法的不同主要表现在骨架生成的时机、信息综合和对人体结构特征知识的使用上:1) 图1与图3显示了我们的方法与传统方法在骨架生成时机的选择上的不同:传统方法通过预先约定来保证两者骨架结构的一致;而我们提出的方法则是将人体模型相应骨架结构的构建推迟到导入运动数据时进行;2) 传统方法在生成骨架时只考虑模型本身的信息;本文的方法提出将模型信息和运动数据的骨架定义进行综合,以自动生成既具有运动数据骨架结构又与人体模型相匹配的骨架层次结构;3) 在利用人体结构特征方面,传统方法一般在较底层使用人体结构的特征;我们的方法充分利用人体整体结构特征,使用统一的数据结构和方法对模型进行语义分析,避免了大量交互以及手工辅助,使骨架生成得以自动化,并且选择导入运动数据时再为模型生成骨架结构,使得模型构建与运动数据采集两个过程真正独立,模型可以适应不同结构的运动数据.三者对比如图6所示.

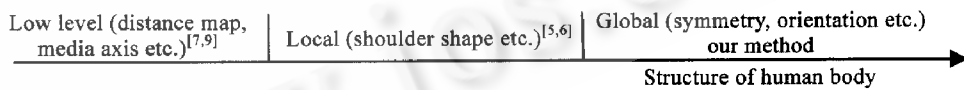


Fig.6 Comparison on the uses of the geometry structure info of human body in discussed methods

图6 相关方法在利用人体结构特征方面的比较

下面对 LMSA 算法中的各个步骤进行复杂度分析:

步骤 I. 如同第 2.2 节中对算法 2 的分析,此步骤的算法复杂度为 $O(N\Delta)$,其中 $N\Delta$ 为虚拟人几何模型的三角面片数;

步骤 II. 此步骤执行 k -均值算法,故其复杂度为 $O(N_p k d T)$,其中 N_p 为备选关节点的个数, k 为分组的个数, d 为样本维数(3), T 为迭代次数,实际运行中往往远小于 N_p ;

步骤 III. 此步骤分别计算各关节和各备选关节点的语义,故其复杂度为 $O(N_J + N_p)$,其中, N_J 是运动数据定义的骨架结构中的关节个数; N_p 是备选关节点的个数;

步骤 IV. 此步骤对每个关节 J , 在所有的备选关节点中进行搜索,因此其复杂度为 $O(N_J \times N_p)$,但若根据关节的偏向属性 *Orientation* 进行筛选,又由备选关节点在每条关节链路上按照 *Distance* 属性有序,因此可采用折半查找算法对此步骤进行优化,优化后复杂度为 $O\left(N_J \log_2\left(\frac{N_p}{k}\right)\right)$, k 为分组数;

步骤 V. 此步骤需要对虚拟人几何模型的每个面片的顶点都进行附着,故复杂度为 $O(N\Delta)$.如前, $N\Delta$ 为虚拟人几何模型的三角面片数;

步骤 VI. 此步骤是对各关节计算调整姿态的变换矩阵,其复杂度为 $O(N_j)$, N_j 是运动数据定义的骨架结构 r_1 的关节个数.

综合上面所述的复杂度,依次执行步骤 I~步骤 VI,因此复杂度为

$$O\left(N\Delta + N_p kdT + N_j + N_p + N\Delta + N_j \text{Log}_2\left(\frac{N_p}{k}\right)\right) \text{ 或 } O\left(2N\Delta + N_p(kdT + 1) + N_j\left(2 + \text{Log}_2\left(\frac{N_p}{k}\right)\right)\right).$$

式中,各符号意义如前所述.其中,由于步骤 I~步骤 III 为算法的 LMSA 离线部分,而步骤 IV~步骤 VI 为在线部分,故 LMSA 算法在线部分复杂度为 $O\left(N\Delta + N_j\left(1 + \text{Log}_2\left(\frac{N_p}{k}\right)\right)\right)$.可见,在线部分可实时完成.而文献[7]的算法复杂度为 $O(N^2)$,文献[9]的复杂度为 $O(M^2)$. N 是模型面片数目, M 是模型所占体素的个数.

3.2 实验结果

图 7 是我们的实验截图.该人体模型具有 9 062 个顶点,面片个数为 18 110 个,模型本身不带骨架结构.图 7(a)、图 7(b)显示我们的方法首先对模型用平行平面截取;然后,生成备选关节点集并进行剖分(图 7(c));图 7(d)、图 7(e)显示在导入运动数据 1 后,经过语义分析生成模型的骨架结构;图 7(f)~图 7(i)和图 7(j)、图 7(k)分别为导入运动数据 1 和运动数据 2 后驱动人体模型的过程,其中,运动数据 1 和运动数据 2 不仅关节数目不同,而且关节的字符串语义也不相同.

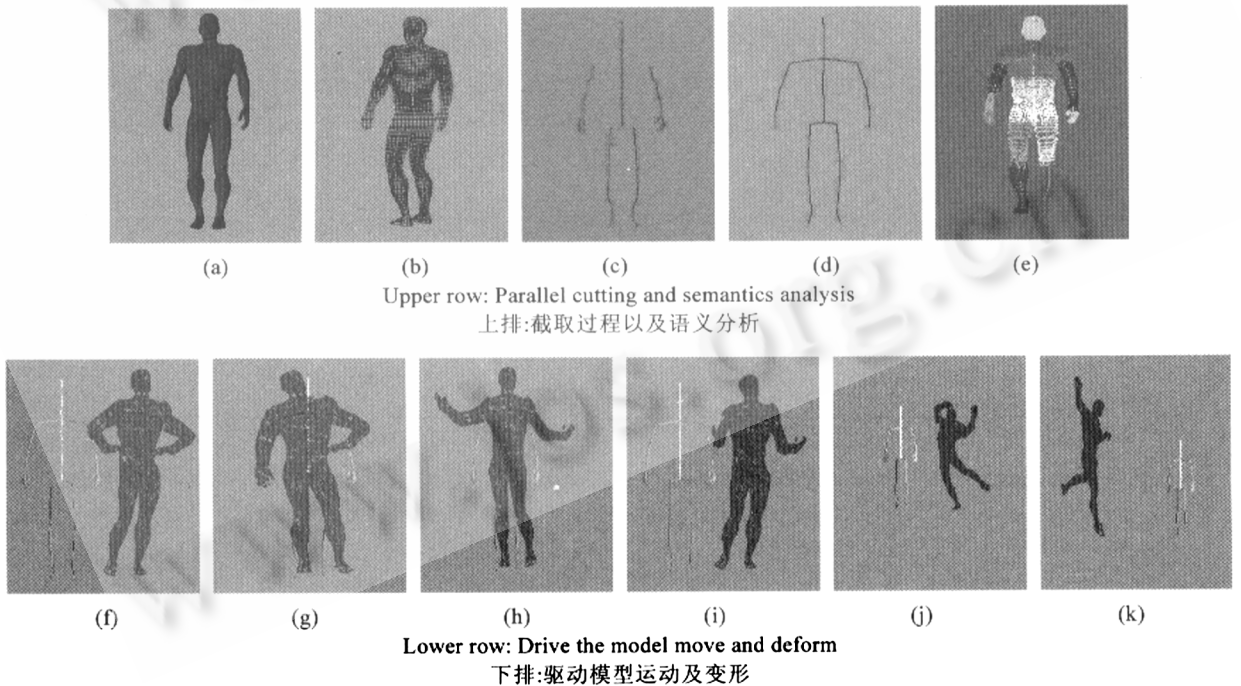


Fig.7 Experimental results

图 7 实验结果

3.3 进一步的工作

我们可以将算法推广到不具有第 2 节中假设的 H 型或者 V 型姿势的虚拟人模型上.通过计算人体模型的有向包围体树的结构(OBB tree),解析出人体的朝向等信息.同时,这种方法也可应用于不符合假设 2 的人体几何模型.另一方面,我们也准备引入 FFD(free form deformation),以研究如何在骨架基础上进一步生成与模型结合的 FFD 变形控制网格.

References:

- [1] Lewis JP, Matt C, Nickson F. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In: Brown JR, Akeley K, eds. Proc. of the 27th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press/Addison—Wesley Publishing Co., 2000. 165–172.
- [2] Singh K, Kokkevis E. Skinning characters using surface oriented free-form deformations. In: Fels S, Poulin P, eds. Proc. of the Graphics Interface, Canadian Human-Computer Communications Society 2000. Montreal: Canadian Human-Computer Communications Society, 2000. 35–42.
- [3] Allen B, Curless B, Popovic Z. The space of human body shapes: Reconstruction and parameterization from range scans. ACM Trans. on Graphics, 2003,22(3):587–594.
- [4] Ju XY, Siebert JP. Individualising human animation models. In: Proc. of the Eurographics. Manchester, 2001. <http://www.dcs.gla.ac.uk/publications/PAPERS/7047/eg2001.pdf>
- [5] Dekker L, Douros I, Buxton BF, Treleven P. Building symbolic information for 3D human body modeling from range data. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa: IEEE Computer Society, 1999. 388–397.
- [6] Oliveira J, Zhang D, Spanlang B, Buxton B. Animating scanned human models. Journal of WSCG, 2003,11(2):362–369.
- [7] Teichmann M, Teller S. Assisted articulation of closed polygonal models. In: Arnaldi B, Hégron G, eds. Computer Animation and Simulation, Lisbon, Portugal: European Association for Computer Graphics, 1998. 87–101.
- [8] Hubbard PM. Approximating polyhedra with spheres for time-critical collision detection. ACM Trans. on Graphics, 1996,15(3): 179–210.
- [9] Wade L, Parent RE. Fast, fully-automated generation of control skeletons for use in animation. In: Proc. of the 2000 Conf. on Computer Animation. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2000. 164–169.
- [10] Katz S, Tal A. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. ACM Trans. on Graphics, 2003,22(3):954–961.
- [11] Yang CS, Wang ZQ, Gao W, Chen YQ. Skeleton building of individual virtual human model. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004,16(1):67–72, 78 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhuang YT, Liu XM, Pan YH, Yang J. 3D human skeleton reconstruction from motion image sequence. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004,12(4):245–250 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [11] 杨长水,王兆其,高文,陈益强.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):67–72,78.
- [12] 庄越挺,刘小明,潘云鹤,杨骏.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.



胡晓雁(1978—),男,江西南昌人,博士生,主要研究领域为虚拟人建模与仿真.



赵沁平(1948—),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为虚拟现实,分布式应用系统,人工智能.



梁晓辉(1970—),男,博士,副教授,主要研究领域为分布式虚拟现实.