

面向艺术与设计虚拟人技术比较研究^①

Comparative Study on Virtual Human Techniques for Art and Design

王军华 吕克志 (浙江工业大学 浙西分校 现代教育技术中心 浙江 衢州 324000)

摘要: 在面向艺术与设计虚拟人技术领域, 建模、皮肤变形、运动控制是其基本问题。首先介绍了基于经验知识、人体解剖学以及基于物理模拟的虚拟人研究方法, 然后介绍了基于样本插值的虚拟人研究方法。最后对两种方法进行了比较研究, 并展望了未来的发展方向。

关键词: 虚拟人 虚拟人建模 皮肤变形 运动控制

面向艺术与设计虚拟人技术着眼于人类特性的数字化再现。虚拟人技术在艺术与设计的多个领域有着广泛的应用, 包括: ①体育运动与舞蹈仿真, ②游戏娱乐、在线服务等交互式应用, ③计算机辅助教学和虚拟会议, ④虚拟环境仿真等领域。虚拟人技术在研究范围上有广义和狭义之分。根据 Badler 和 Thalmann 等人的总结, 狭义的虚拟人技术主要研究表现人类的几何和行为特性, 即生成的虚拟人需要具有合理可信的人体尺寸和外观和合理可信的姿态、动作和行为特性。其技术研究领域主要在虚拟人建模、皮肤变形、运动控制技术三方面。

可以认为基于经验知识、人体解剖学以及基于物理模拟的虚拟人技术是一种知识驱动的技术路线。样本插值方法是一种表现驱动技术路线。本文首先对传统的基于经验假设、人体解剖学、物理模拟的虚拟人技术做一总结, 然后从虚拟人建模、皮肤变形、运动控制三方面讨论样本插值方法在虚拟人技术中的应用, 在比较两种技术路线的差异后探讨未来的发展。

1 基于经验知识、人体解剖学、物理模拟的虚拟人技术

基于经验假设、人体解剖学、物理模拟的虚拟人技术在面向艺术与设计虚拟人应用中相关工作主要在人脸和人体建模、皮肤变形、运动控制领域。

1.1 虚拟人建模

1.1.1 人脸建模

人脸建模包括静态人脸三维网格生成(即所谓中性人脸, 包括真实个体人脸三维网格生成、虚构但具有视觉可信度的人脸三维网格生成)、动态人脸变形(如表情生成、唇部发声、艺术夸张变形等)。

Parke 基于多边形表示给出了一种参数化的人脸模型^[1]。基于一组参数值, 该模型可以变形产生各种脸部表情, 即实现了脸部表情的参数化生成。Waters 根据简化的解剖学知识提出了一种基于肌肉物理特性的人脸模型, 通过设定一组肌肉的拉伸和收缩系数控制脸部顶点位移生成人脸表情^[2]。因为人脸表情生成的复杂性, 上述方法是简化人脸解剖模型, 所以产生的表情呆板生硬。与真实感的要求相差甚远。

20 世纪九十年代以来, 基于真实人脸图像和视频的建模技术成为人脸建模与表情生成的主要研究方向。代表技术有基于多角度人脸图像建模技术, 如 Pighin 提出的基于图像建模与绘制技术^[3]。基于图像的方法首先需要对真实人脸进行不同角度的拍照, 最简单的是采用人脸的正面和侧面图像。Pighin 方法根据事先选定的人脸特征点, 用手工方式在人脸图像上标注特征点。然后以匹配特征点和特征线的方式变形一张三维人脸网格模板以获得特定人脸。在获得同一人脸不同表情的图像前提下, 利用全局和局部人脸区域(网格顶点和纹理同时)Morphing 方法生成可信度较高的各种表情。该方法的创新之处在于它提供了一

① 收稿时间:2008-12-03

种简便易行的方法用于获取真实人脸的三维网格模型。缺点在于人工介入程度较高,特征点指定误差大。

1.1.2 人体建模

面向艺术与设计的虚拟人人体建模的基本目标是建立视觉可信的虚拟或真实人体。虚拟人建模的可能目标还包括支持皮肤变形、运动控制、着装冲突检测等任务。早期的人体表示几何建模常采用以下几种方法:棒模型,表面模型,体模型(或称分层模型)。棒模型将人体简化为骨骼,在可视性方面显然不能满足人们的需求。在传统的由骨架运动和肌肉运动决定人体皮肤变形的技术路线下,表面模型在完成皮肤变形、生成人体运动方面先天不足。因此体模型成为应用最广泛的人体表示方法。D Thalmann 提出一种虚拟人分层表示方法,所提出模型包括基本骨架层、肌肉层和皮肤层^[4]。该模型代表了当时人体解剖学建模的最好结果。基于解剖学假设的人体建模缺点在于建模的复杂性和计算量大。从真实人体外观形态精确估计其内在的骨架尺寸、肌肉脂肪层属性是另外一个难题。

1.2 皮肤变形

传统的皮肤变形方法是除定义皮肤层之外,另定义由骨骼、关节组成的层次化骨架,然后绑定表面皮肤到各骨骼,建立骨架运动影响皮肤变形的关联关系,该过程称为蒙皮(Skinning)。最早出现的皮肤变形方法称之为刚性皮肤变形方法。虚拟人由多个彼此独立的部位组成,通过把每个网格映射到一个特定骨骼(或关节)上,可以获得随骨架一起运动的刚性皮肤。刚性骨骼皮肤绑定方法计算公式为:

$$V' = M_j L_j^{-1} V \quad (1)$$

式中 V 和 V' 表示世界坐标系下变形前和变形后的座标位置。 L_j^{-1} 为关节 j 的局部坐标变换矩阵, M_j 表示关节 j 包含平移和旋转运动的变换矩阵。刚性皮肤变形方法缺点是明显的,运动时皮肤分段之间可明显看到不连贯。

N.Thalmann 首先引入了依赖于关节的局部变形算子^[5],该方法后来发展为著名的 SSD(Skeleton Subspace Deformation)、或称 SDD。(Skeleton Driven Deformation)方法。在 SSD 算法中首先要将

皮肤网格的每一个顶点与一组关节关联,称为影响关节,并设定相应权值。SSD 骨骼皮肤绑定算法计算公式为:

$$V' = \sum_{j=1}^n w_j M_j L_j^{-1} V, \text{ 并且 } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (2)$$

式中 n 表示和顶点 V 关联的关节数量。

SSD 方法是一种依据主观经验和人体解剖学知识的皮肤变形方法。缺点在于绑定和权值设置费时费力,效果的好坏完全依赖于个人经验。同时前臂弯曲和扭曲时肘关节会发生“塌陷”和“萎缩”等失真现象。对于一些灵活的身体区域,例如肩膀部位,某些姿态下的变形失真更为严重。产生该问题的根本原因在于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空间中。因为所采用的简化人体解剖和运动模型不尽合理,导致模型所定义的骨骼皮肤运动变形空间和真实的运动变形空间不尽吻合。

为了解决 SSD 方法的缺陷,部分研究者做了一些改进。如 Kavan 采用旋转角度插值代替局部坐标系位置插值改善 SSD 中的插值结果^[6]。

1.3 运动控制技术

比较常用的运动控制方法有关键帧、逆运动学、运动捕获等方法。

1.3.1 关键帧方法

关键帧方法是通过设定人体运动过程中的一些关键姿态,通过对运动参数进行插值计算出若干中间帧姿态,从而生成完整的人体运动。人体有两百多个自由度,手工给出每个关键姿态下的每个自由度是非常困难的,且其物理逼真性也难以验证。

1.3.2 逆运动学(IK)方法

IK 方法源于机器人学中链杆运动的处理。它在给定链杆末端的位置与方向时,计算出关节链结构的状态矢量,进而得到各关节的空间位置。这种方法的计算量比较大,而且所生成运动的逼真性仍然依赖于人的手工操作。

1.3.3 运动捕获方法

MOCAP 是一种虚拟现实方法。通过传感器(电磁、光学、机械)记录真实的人体运动数据,合成后将其映

射到虚拟人体上。该方法已经成为当前最重要的运动获取和生成技术。

2 基于样本插值的虚拟人技术

2.1 虚拟人建模

2.1.1 人脸建模

因为基于多张不同侧面图像的人脸建模方法人工干预较多,同时对人脸模型缺乏有效的参数化控制手段,为此 Blanz 提出了基于三维人脸样本数据库生成三维人脸模型的方法^[7]。该方法使用三维激光扫描仪采集并建立三维人脸样本数据库。为能在各样本间实现插值运算,该方法将三维人脸模型柱面展开成二维图像,然后基于 2D 光流运算建立一致性对应关系。所谓样本间的一致性对应关系是指插值运算的各样本具有相同的顶点数量和相同的顶点连接关系。经 PCA 数据降维后,基于线性插值即可生成新的虚拟人脸。为生成真人人脸模型,对于输入的一张二维人脸图像,通过最小化(3)式可以实现基于二维图像重建三维人脸几何与纹理信息。(3)式 I_{input} 是给定的二维人脸图像, I_{model} 是根据 Phong 光照模型计算产生的二维图像。

$$E_l = \sum_{x,y} \|I_{input}(x,y) - I_{model}(x,y)\|^2 \quad (3)$$

相对传统的基于人脸图像建模技术,基于样本插值的人脸建模方法自动化程度高且视觉效果好。同时提供了基于性别、脸部皱纹、脸型瘦削或圆润等人脸社会学属性的模型调整和表情生成方法(如图 1 所示)。

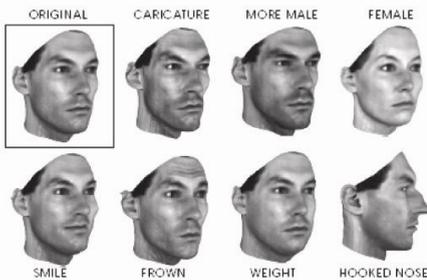


图 1 基于人脸社会学属性的模型调整

2.1.2 人体建模

Allen 以 CAESAR 三维人体数据库为样本,根据样本事先标注的特征点,基于匹配人体模板到各样本的方法建立各样本之间的对应关系^[8]。具体算法是通过最小化一由顶点距离误差函数、特征点对应误差函数、平滑度误差函数组成的能量函数,计算出每个顶

点的仿射变换矩阵,从而获得和人体模板具有一致性对应关系的样本。各样本建立对应关系后,基于 PCA 方法实现数据降维。因为每个人体进行三维扫描时采用的是相同姿态,所以仅线性插值就可以生成新的人体模型。虽然文中没有提出根据人体二维图像生成三维人体几何与纹理信息的方法,显然 Blanz 方法可以推广到人体重建领域。根据每样本的年龄、体重、身高等属性,该方法也提出了一种基于人体社会学属性的模型调整方法(如图 2 所示)。

类似于 Allen 方法, Seo 和 N Thalmann 实现了基于人体三维扫描多样本插值的人体建模方法^[9]。可以认为,随着三维扫描技术的发展,基于大样本构造三维人体几何参数空间、纹理参数空间和社会学属性参数空间,采用插值方法生成虚拟人是一种自然的技术发展路线。

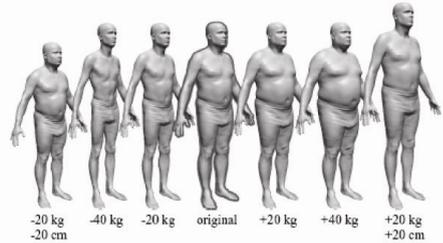


图 2 基于人体社会学属性的模型调整

2.2 皮肤变形

总体上基于样本插值的皮肤变形技术包括有骨架驱动和无骨架驱动两类方法。

2.2.1 骨架驱动的皮肤变形方法

骨架驱动的皮肤变形方法事先需要定义人体骨架。在设定骨架姿态参数后,最终由骨架驱动皮肤变形。但是样本插值的皮肤变形方法和传统方法不一样,其皮肤变形不是由骨架中的骨骼牵动肌肉,肌肉影响皮肤来完成。其皮肤变形数据来源于一系列关键姿态下已有的皮肤变形结果,然后通过插值迁移获得可信的变形效果。姿态空间变形算法 PSD 是该类方法的典型代表^[10]。

PSD 方法首先需要定义一初始骨架和皮肤网格,作为姿态模板。然后人工设定新姿态并对新姿态做相应皮肤变形,计算出该姿态下各皮肤控制顶点相对于初始姿态的偏移量 δ 。因为所有新姿态由同一姿态模板生成,所以各样本之间的对应关系事先得保证。PSD 方法的最终皮肤变形结果由 $p + \delta$ 决定,其中 p

为刚性骨骼运动, δ 为皮肤控制顶点偏移量。因为 p 是人为设定的, 是已知量, 而 δ 可由(4)式得出。

$$\vec{\delta} = f_{interp}(configuration) \quad (4)$$

式中 **configuration** 为刚性骨骼参数, **interp** 采用 Gaussian RBF 插值法。

Sloan 采用类似的方法实现了对人体上肢的运动控制和皮肤变形^[11]。

2.2.2 无骨架驱动的皮肤变形方法

James^[12]提出的 SMA 模型方法开创了基于样本库的皮肤变形新方法。传统的 SSD 方法和其他如 PSD 样本插值方法, 在获得人体静态几何表示模型之外, 需要另定义刚性骨架用于驱动皮肤变形。基于 SMA 模型的皮肤变形方法另辟蹊径, 将骨架的概念从由分层骨骼连接而成的刚性结构推广为非层次以部分网格顶点为代理骨骼的柔性结构。SMA 方法将各样本中具有相同旋转变换分量的这些三角形定义为柔性骨骼系统, 通过均值漂移聚类方法将部分三角形确定为代理骨骼。然后基于最小二乘方法将每个顶点绑定到这些代理骨骼上(每顶点相关骨骼数量最大值由用户指定), 在绑定的同时确定了绑定权值。SMA 方法相对于 SSD 优点在于: ①不需要定义人体骨架; ②实现了绑定子集和绑定权值的自动计算。

2.3 运动控制技术

基于样本插值的运动控制方法是对逆运动学方法、运动捕获等方法在样本插值领域的创新。传统的 IK、MOCAP 方法需要事先定义骨架, 运动信息最终映射到骨架上。而基于样本插值的运动控制方法不需要事先定义骨架。

Sumner^[13]提出了 MeshIK 方法。MeshIK 方法首先给定一初始姿态模型 P_0 , 基于人工方法将 P_0 变形得到一个新的姿态 P , 根据每个三角形的变形梯度构造姿态 P 的特征向量, 再以特征向量为基构造一个特征向量空间。在 MeshIK 指定几个点位置的约束条件下, 求解(5)式所示的最小二乘问题, 使得重建后的姿态误差最小。

$$x^*, w^* = \operatorname{argmin}_{x, w} \|Gx - (Mw + c)\| \quad (5)$$

式中 G 是只和 P_0 有关的变形梯度算子, w 表示系数, x 是姿态中各顶点三维空间位置参数组成的向量(约束点除外), c 是常量。

为了解决样本插值的路径问题, 基于极分解(Polar Decomposition)将三角形变形梯度 T 分解成旋转分量和缩放/错切分量, 即 $T=RS$ 。缩放/错切分量 S 可直接进行线性插值。对于旋转分量 R , 经对数运算将 R 映射到李代数 $so(3)$ 中, 经线性插值后基于指数运算将结果映射回三维旋转群 $SO(3)$ 中。

Der^[14]基于 SMA 模型改进了 Sumner 的结果。MeshIK 方法虽然实现了不需要建立人体骨骼系统就可以进行运动控制。但其缺点在于每个三角形独立进行旋转缩放, 计算复杂度和几何复杂度成正比。因此模型网格点在 50000 以下才能实现实时运动控制。Der 利用 SMA 模型, 提取了模型的代理骨骼点, 使得只部分代理骨骼三角形进行旋转缩放, 从而提高了计算速度。改进的结果可以实现大型带丰富细节点云模型的实时运动控制。

3 两种技术路线的比较研究

对于一种建模和动画技术, 可以从结果的视觉可信度、人工介入程度、是否支持直观的控制和参数化修改等方面进行考察评判。

在视觉可信度方面, 相比较人体解剖学方法, 样本插值方法优势是明显的。根据人体艺术解剖学知识, 影响人体表面形态主要有骨骼和关节组成的骨架、肌肉组织、脂肪层和皮肤层。成人骨骼数量为 206 块, 人体关节形成的自由度超过 200 多个。影响人体外观、姿态的骨骼肌超过 600 块。每人的脂肪层厚薄分布均不相同。要通过人体解剖学方法实现具有高视觉可信度的人体建模、皮肤变形、运动控制显然是相当困难的。目前所使用的模型都是忽略部分可变量, 是真实人体的简化模型。基于样本插值方法因为数据来源于大量真实模型的测量采样结果, 显得更为真实可靠。在皮肤变形结果的视觉可信度方面, SSD 方法存在严重的塌陷和萎缩的问题。其缺陷产生的根本原因在于所采用的简化人体解剖模型不尽合理, 模型所定义的骨骼皮肤运动变形子空间和真实的运动变形空间不尽吻合。而在 PSD 方法和 SMA 方法中不存在这个问题。在人工介入程度方面, 相比较经验假设方法, 样本插值方法可以减少人工介入。在皮肤变形方法中 SSD 算法需要人工决定每个皮肤顶点和哪些骨骼有关联及关联权值, 这既是费时费力的工作, 同时对操作者的经验知识要求非常高。而在 James 提出的 SMA 方法中,

一旦用于插值的样本间建立了一致性对应关系,其绑定和权值估计实现了自动处理。因为样本集本身包含了皮肤变形和运动信息。

在模型的直观控制和参数化修改方面,基于样本插值的虚拟人建模方法可以根据每个样本事先标注的某一社会学属性值(如年龄、胖瘦等),生成该属性的特征向量。以后对一给定的虚拟人模型,只需线性增减该特征向量,即可得到根据该属性调整后得到的高可信用虚拟人模型。在目前传统方法中还没有看到类似的方法。

样本插值方法的主要缺点在于:(1)插值结果的好坏严重依赖样本数量,如果数量不够,则生成的插值结果不一定平滑。(2)对于具有 200 多个自由度的虚拟人,要能插值生成各种姿态,所要求的最小样本数量尚没有理论依据,不够明确。(3)为实现样本间对齐关系所需计算工作量巨大。

4 结语

本文介绍了艺术与设计虚拟人领域基于经验知识、人体解剖学以及基于物理模拟的知识驱动方法,和基于样本插值的表观驱动方法,并从视觉可信用、人工介入程度、是否支持直观的控制和参数化修改三个方面做了比较研究。现阶段基于样本插值的虚拟人研究取得了许多成果。考虑到艺术与设计虚拟人领域对计算速度和生成效果的双重要求,随着更快计算工具的出现以及新的数学方法应用到工程领域,基于人体解剖学和基于物理模拟的研究技术在艺术与设计虚拟人领域仍会取得新的进展。

参考文献

- 1 Parke F. Parameterized models for facial animation. *Computer Graphics and Applications*, 1982,2(9):61-68.
- 2 Waters K. A muscle model for animation three-dimensional facial expression. *Computer Graphics*, 1987,21 (4):17-24.
- 3 Pighin F, Hecher J, et al. Synthesizing realistic facial expressions from photographs. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 98*. Orlando, Florida, 1998:75-84.
- 4 Thalmann D, Shen J, Chauvineau E. Fast realistic human body deformations for animation and VR applications. *Proceedings of Computer Graphics International 96*. IEEE Computer Society Press, 1996: 166-174.
- 5 Lazarus F, Coquillart S, Jancene P. Axial deformations: an intuitive deformation technique. *Computer-Aided Design*, 1994,26(8):607-613.
- 6 Kavan L, Zara J. Real Time Skin Deformation with Bones Blending, WSCG'2003, short paper.
- 7 Blanz V, Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 99*. Los Angeles, California, 1999:187-194.
- 8 Allen B, Curless B, Popovic Z. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):587-594.
- 9 Seo H, Magnenat-thalmann N, An automatic modeling of human bodies from sizing parameters. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics*. Monterey, California, 2003:19-26,234.
- 10 Lewis JP, Cordner M, Fong N. Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*. New York, USA, 2000:165-172.
- 11 Sloan P, Rose C, Cohen M. Shape by example. *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*. ACM Press, 2001:135-143.
- 12 James DL, Twigg CD. Skinning mesh animations. *ACM Transactions on Graphics*, 2005,24(3):399-407.
- 13 Sumner RW, Zwicker M, et al. Mesh-based inverse kinematics. *ACM Transactions on Graphics*, 2005,24 (3):488-495.
- 14 Der KG, Sumner RW, Popovic J. Inverse kinematics for reduced deformable models. *ACM Transactions on Graphics*, 2006,25(3):1174-1179.