

# 虚拟人体逆向建模方法及对比

任雨佳<sup>1</sup>, 林温妮<sup>2</sup>, 王旭<sup>\*3</sup>, 赵慧<sup>3</sup>, 魏蒙嫻<sup>3</sup>

(1. 上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620; 2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 3. 河南工程学院 服装学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:**逆向工程技术可实现对复杂曲面模型的构建,但是逆向建模方法对模型效果的影响不容忽视,常用的逆向建模方法包括 NURBS 曲面建模、多边形建模以及两者结合建模。以人体前臂为例,选取3款建模方法不同的逆向建模软件 Imageware, Geomagic Studio 和 MeshLab 构建模型,对比其建模流程以及模型效果,分析适合构建虚拟人体模型的逆向建模方法。研究表明,NURBS 曲面建模与多边形建模相结合的方法更适合构建虚拟人体模型,该结果可以为快速高效建立高精度人体模型提供技术参考。

**关键词:**逆向工程技术;虚拟人体模型;建模方法;点云偏差;点云数据

**中图分类号:**TS 941.17 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)03-0196-07

## Reverse Modeling Methods and Comparison of Virtual Human Body

REN Yujia<sup>1</sup>, LIN Wenni<sup>2</sup>, WANG Xu<sup>\*3</sup>, ZHAO Hui<sup>3</sup>, WEI Mengyuan<sup>3</sup>

(1. School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. School of Fashion, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** Reverse engineering technology can realize the construction of complex surface models. But the influence of reverse modeling methods on the model effect can not be ignored. The common reverse modeling methods include NURBS surface modeling, polygon modeling and the combination of two modeling methods. Taking human forearm as an example, this article selected three reverse modeling software Imageware, Geomagic Studio, and MeshLab with different modeling methods to build the model, compared their modeling processes and effects, and analyzed the reverse modeling method suitable for building virtual human model. The results show that the modeling method that combines NURBS surface modeling and polygon modeling is more suitable for constructing virtual human model. The results can provide technical reference for building high-precision human model quickly and efficiently.

**Key words:** reverse engineering technology, virtual human model, modeling method, point cloud deviation, point cloud data

逆向工程技术是一种利用三维扫描仪获取现有产品的点云数据,进而创建产品 CAD 模型的技术<sup>[1]</sup>,其关键技术包括三维人体扫描技术、数据预处理技术和曲面重构技术<sup>[2]</sup>。逆向工程技术在服装领域主要应用于纺织品性能检测、服装结构样板设计以及虚拟人体模型构建,其中虚拟人体模型是

计算机人体仿真技术的研究重点。人体模型尺寸的不精确会造成服装样板不合体、虚拟试穿效果差等问题,影响个性化服装定制以及虚拟试衣系统的发展。

LIU K X 等<sup>[3]</sup>提出了一种混合建模方法,针对人体形态的差异,分别采用逆向建模、正向建模、图

收稿日期:2020-12-05; 修订日期:2021-04-13。

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(20B540001);中国纺织工业联合会指导性项目(2018082)。

作者简介:任雨佳(1997—),女,硕士研究生。

\*通信作者:王旭(1981—),女,副教授,博士。主要研究方向为服装人体工学及数字化技术。Email:wangxu0086@126.com

像建模 3 种思路进行人体模型的构建,最终获得具有精确尺寸的虚拟人体模型。其中,逆向工程技术用于构建人体四肢和躯干,是建模过程中应用范围最广的技术。基于逆向工程技术的模型构建过程包括数据采集、数据处理、曲面重构 3 个部分。KULCZYK T 等<sup>[4]</sup>分析了不同数据采集方法对三维牙齿模型准确性的影响,发现在具有复杂形态的牙齿区域中,不同数据采集技术创建的模型有显著差异,并指出数据处理以及曲面重建过程也会对三维模型的精度产生重大影响。虚拟人体模型中应用的建模方法主要为 NURBS (non uniform rational B-spline,非均匀有理 B 样条)曲面建模和多边形建模。杜剑侠等<sup>[5]</sup>通过分析逆向建模方法的特点,提出一种混合人体建模方法,即利用 NURBS 曲面建模方法对精度要求较高的四肢和躯干进行建模,采用多边形建模方法对头、手、脚进行建模,最终构建高精度人体模型。

综上所述,不同逆向建模方法构建的模型精度存在差异,因此模型构建时选择合适的逆向建模方法是保证模型精度的关键,但目前有关虚拟人体模型逆向建模方法的对比研究较少。因此,文中以青年女性前臂为例,选取 3 款建模方法不同的逆向工

程软件Imageware,Geomagic Studio 和 MeshLab,对比分析其在建模流程、模型效果方面的差异,进而得出适合构建虚拟人体模型的逆向建模方法。

# 1 逆向建模软件介绍

为比较不同的逆向建模方法,选用两款使用范围较广的商业软件 Imageware,Geomagic Studio 和一款网格处理开源软件 MeshLab,从建模过程、模型种类、偏差评估 3 方面进行对比分析,具体结果见表 1。Imageware 软件由美国 EDS 公司出品,该软件通过 NURBS 曲面建模方法,直接控制曲度获得高质量曲面,主要用于开发对曲面质量要求较高的现代工业产品,如航空发动机的涡轮叶片<sup>[6]</sup>、头盔<sup>[7]</sup>等。MeshLab 软件使用的是多边形建模方法,具有强大的处理非结构化三角网格模型功能,常用于转换文件格式<sup>[8]</sup>、获取特征点坐标<sup>[9]</sup>、消除网格错误以及模型的重新网格化<sup>[10]</sup>等。Geomagic Studio 软件由美国 Raindrop 公司出品,该软件结合了多边形建模和 NURBS 曲面建模方法,能够实现多边形曲面与 NURBS 曲面的自由转换,且误差分析指标全面,常用于工艺品或日常用品(如玩具)的造型设计<sup>[11]</sup>。

表 1 Imageware,Geomagic Studio 和 MeshLab 3 款建模软件对比

Tab.1 Comparisons of three modeling software Imageware, Geomagic Studio and MeshLab

项 目	软件对比		
	Imageware	Geomagic Studio	MeshLab
建模方法	NURBS 曲面建模	多边形及 NURBS 曲面建模	多边形建模
建模过程	点:数据精简—去除噪点—点云定位	点:删除体外孤点—删除非连接项—减少噪音	点:统一点云法向量
	曲线:创建平行点云截面—拟合公差曲线—曲线重新参数化	多边形:封装点云数据—填充漏洞—修复错误网格—平滑处理	多边形:重建曲面—清理网格—构建泊松曲面—删除多余面—细分光滑
	NURBS 曲面:微调曲线控制点—构建放样曲面	NURBS 曲面:探测轮廓线—曲面片处理—格栅处理—NURBS 曲面处理	
模型类型	NURBS 曲面模型	NURBS 曲面模型	多边形模型
偏差评估	最大偏差、平均偏差、标准偏差	最大偏差、平均偏差、标准偏差、RMS(均方根)	无

## 2 数据采集

### 2.1 仪器

VITUS Smart LC 型三维人体扫描仪,德国 Human Solutions 公司制造。

### 2.2 数据采集方法

数据采集是逆向建模的第 1 步,直接影响建模的难易程度以及曲面模型的质量。文中使用三维

人体扫描仪对一名体型接近 160/84A 的健康女大学生进行三维人体扫描。由于光学遮挡会导致人体点云数据的缺失,所以需要对志愿者的站位和姿势进行调整,最终得出扫描漏洞最小的姿势,具体如图 1 所示。志愿者位于测试台一角,身体向外侧扭转 45°,手臂自然下垂,上身向测试台中心倾斜,使手臂位于测试台中心点的正上方。校准仪器后开始扫描,获得的点云数据如图 2 所示,将点云数据

导出为 ASC 格式。



图 1 扫描姿势示意

Fig. 1 Schematic diagram of scanning posture

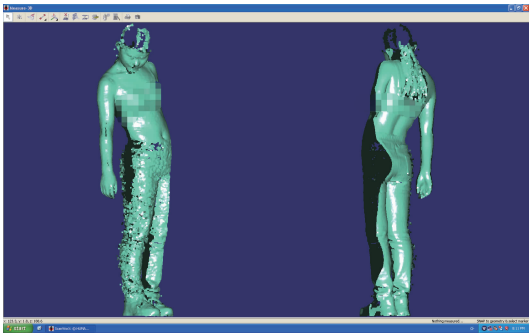


图 2 三维扫描的人体点云数据

Fig. 2 Human point cloud data of 3D scanning

3 逆向建模方法

在建立模型之前,首先需要删除多余的人体点云数据,保留前臂点云。为了保证初始点云数据的统一,使用 Imageware 软件的点云截取工具获取前臂点云,然后将前臂点云以 ASC 格式分别导入 3 款软件中进行后续的建模操作。

3.1 Imageware 建模过程

3.1.1 预处理阶段 室内光线的变化、设备的不稳定、人体的轻微移动等因素都会影响点云数据的准确性,因此需要对点云数据进行数据优化处理。Imageware 软件的数据预处理包括点云截取、数据精简、去除噪点、点云定位等操作,目的是去除点云数据中的噪音点。通过信息查询明确可用数据点的数量,由于文中研究所用的人体前臂点云数量较少,可以省略点云数量精简的步骤。点云坐标系与软件默认坐标系的不一致会影响曲线的生成,因此需要对点云进行重新定位。Imageware 软件提供了多种定位模式,如 321 定位、交互模式 321 定位、自动点云定位以及最佳拟合定位等。文中研究采用最佳拟合定位模式,在平行于坐标轴的平面建立一

个目标位置,在无约束条件下选择点云数据和目标位置完成定位。预处理后的前臂点云如图 3 所示。

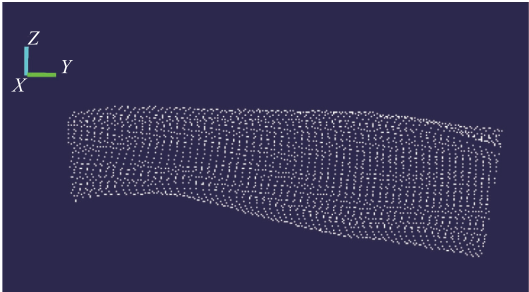


图 3 利用 Imageware 预处理的前臂点云

Fig. 3 Forearm point cloud preprocessed by Imageware

3.1.2 曲线阶段 曲线阶段包括平行点云截面的创建以及公差曲线的拟合,其中平行点云截面曲线是拟合公差曲线的基础。理论上,点云截面越多,曲面与点云的拟合效果越好,但曲面光顺性就会越差,因此需要选择合适的截取方向和截面数量。经多次尝试后获得的平行截面曲线如图 4 所示,在截面曲线的基础上拟合封闭的公差曲线,具体如图 5 所示。利用样条曲线对齐所有公差曲线的起始点,并且统一曲线方向。

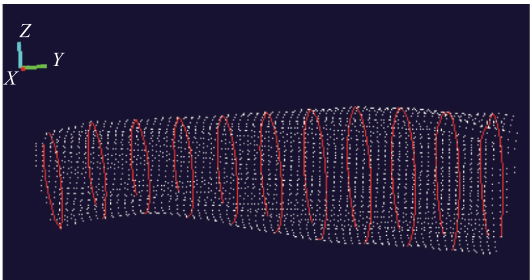


图 4 平行点云截面

Fig. 4 Parallel section of point cloud

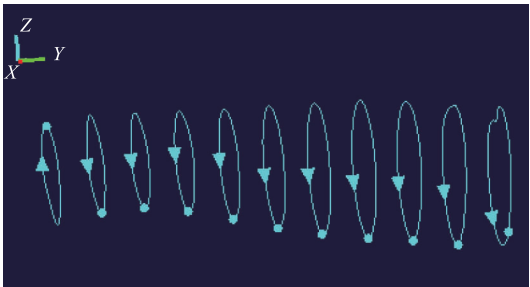


图 5 拟合后的公差曲线

Fig. 5 Fitted tolerance curves

3.1.3 曲面阶段 如果曲率拟合的公差曲线与截面曲线之间存在误差,会影响曲面模型的精度,因此在构建曲面之前,可以通过调节公差曲线的控制点提高两者的契合度。首先,创建曲面之前,曲线必须有相同的起始点和方向,所以需要对这些曲线进行整理和重新参数化,以便重新规划公差曲线上

控制点的数量和分布状况。若控制点繁多且分布杂乱无章,则会构建出畸形曲面。其次,针对点云缺失部位拟合出尖点的问题,需要手动调整曲线控制点,该过程需仔细斟酌、修改,直到公差曲线与截面曲线相符为止,具体如图 6 所示。最后,按照顺序依次选中所有公差曲线,创建放样曲面,最终的前臂模型如图 7 所示。

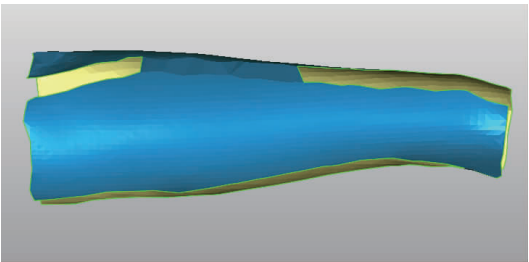


图 9 封装后模型

Fig. 9 Packaged model

**3.2.2 多边形阶段** 封装完成后,点云数据的缺失会导致多边形模型出现孔洞、尖状物、曲面过渡不顺等问题,因此需要利用填充孔、修改网格错误、平滑处理等命令处理多边形模型。填充孔命令包括全部填充和填充单个孔,对于复杂的物体一般选择基于曲率填充单个孔命令。使用网格医生探测多边形模型缺陷,如非流行边、自相交、尖状物、高度折射角、小孔、小组件等,并自动修复。依据曲率填充的三角面片之间存在明显棱角,需要使用平滑命令进行松弛处理。优化后的多边形前臂模型如图 10 所示。

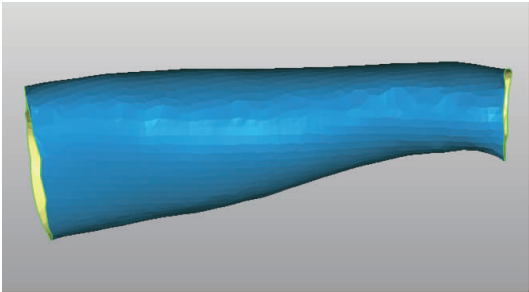


图 10 多边形前臂模型

Fig. 10 Polygonal forearm model

3.2 Geomagic Studio 建模过程

**3.2.1 预处理阶段** 恰当的点云预处理操作可以提高多边形阶段的模型质量。Geomagic Studio 软件的预处理过程包括删除体外孤点、删除非连接项、减少噪音、统一采样等操作。对于数量较少的前臂点云,只需要执行删除体外孤点和减少噪音操作即可,预处理后的前臂点云如图 8 所示。对前臂点云进行封装处理得到多边形模型,封装实质上是依据点云集的空间分布位置用细小的三角片进行连接,封装后的手臂如图 9 所示。

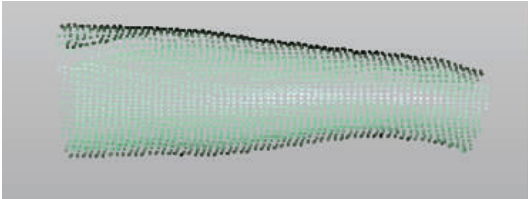


图 8 利用 Geomagic Studio 预处理的前臂点云

Fig. 8 Forearm point cloud preprocessed by Geomagic Studio

**3.2.3 曲面阶段** Geomagic Studio 软件的曲面阶段指多边形模型到高精度 NURBS 曲面模型的转变,包括轮廓线的生成和曲面片的构造。

1) 轮廓线的生成。轮廓线的生成方法有两种,即探测轮廓线和探测曲率。探测轮廓线方法适用于规则的、以二次曲面特征为主的产品模型(如机械零件),探测曲率方法适用于形状复杂、自由曲面较多的产品模型(如工艺品、玩具等)。由手臂的外形特征可知,文中研究应采用探测曲率方法,根据多边形模型表面的复杂程度划分三角网格,随后自动生成轮廓线;沿手臂长度方向执行升级约束命令,将曲率变化较大的轮廓线升级为高曲率轮廓线。

2) 曲面片的构造。根据高曲率轮廓线构建四边形曲面片。首先,执行修复曲面片命令,检查曲面片错误的类型和数量,快速定位到错误曲面片进行错误纠正;其次,选择松弛补丁命令,使曲面片均



匀分布;最后,执行构造格栅命令,将每个曲面片细分为多个小曲面片,具体如图 11 所示,以提高 NURBS 曲面精度。拟合曲面时,设置拟合方法为“适应性”,优化每个曲面片内所使用控制点的数量,最终生成的 NURBS 曲面模型如图 12 所示。

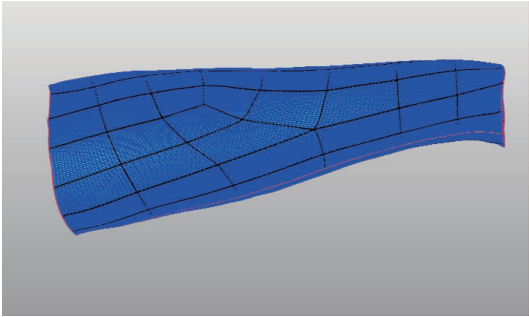


图 11 构造格栅  
Fig. 11 Structural grid

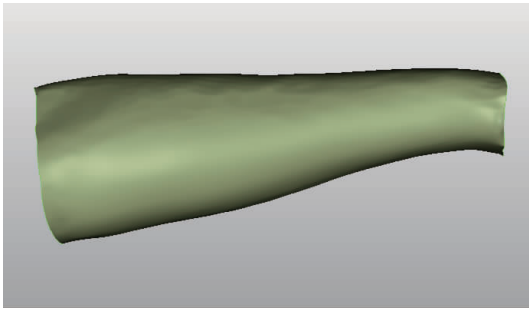


图 12 Geomagic Studio 软件构建的前臂模型  
Fig. 12 Forearm model structured by Geomagic Studio

3.3 MeshLab 建模过程

3.3.1 预处理阶段 扫描得到的点云数据不仅有坐标信息,而且还包括法向量、颜色等信息。在 MeshLab 软件中,点云法向量的一致性会影响曲面重建的效果,因此首先需要将手臂点云数据导入软件中计算点云法向量,使用默认参数统一点云法向量,具体如图 13 所示。

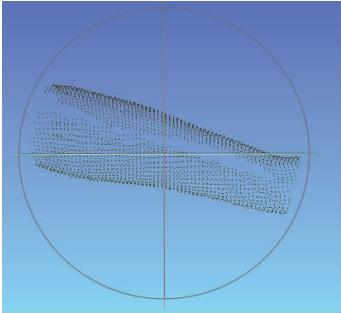


图 13 统一点云法向量  
Fig. 13 Unified point cloud normal vector

将点云数据重新网格化生成网格模型,同时自动修补一定范围内的点云漏洞,具体如图 14 所示。利用网格清理过滤器处理网格模型,主要包括移除

重合面、移除重合顶点、移除非流形三角形、移除孤立面、删除体外孤点等操作,以清理重复且未引用的顶点和曲面,提高曲面质量。

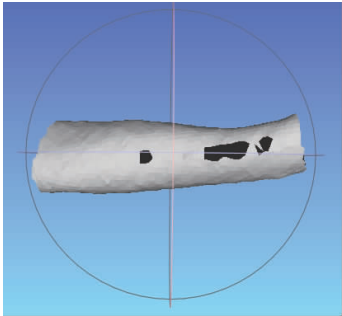


图 14 清理网格模型  
Fig. 14 Clean mesh model

3.3.2 多边形阶段 对于网格模型中存在孔洞以及曲面平滑度较差的问题,MeshLab 软件利用基于泊松方程的隐式曲面构造方法得到多边形模型,具体如图 15 所示,其原理是利用隐函数得到逼近点云的等值曲面。该曲面具有良好的光滑性、封闭性和完整性<sup>[12]</sup>,能够适当修复孔洞,灵活处理点云数据中的噪点<sup>[13-14]</sup>,适用于具有复杂拓扑形状的曲面。利用细分曲面操作增加点和面的数量,使模型更加光滑圆顺,清除手臂腕部和肘部的多余面,得到最终的手臂模型,具体如图 16 所示。

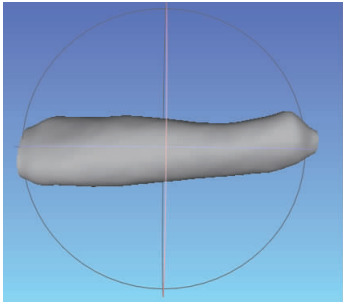


图 15 重建泊松曲面  
Fig. 15 Reconstruct Poisson surface

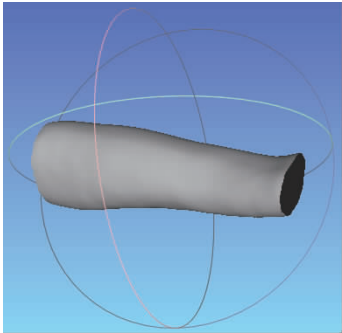


图 16 MeshLab 软件构建的前臂模型  
Fig. 16 Forearm model structured by MeshLab

## 4 结果与讨论

### 4.1 软件操作难度对比

由表 1 的建模过程和实际的建模操作可知,文中研究所用的 3 款软件均可独立完成人体模型的构建。Imageware 软件需要参照截面曲线逐个调整公差曲线的控制点,虽然可以保证曲面的精确度,却增加了建模操作的复杂度;MeshLab 软件操作步骤最少,但只能将模型处理为多边形模型;Geomagic Studio 软件操作步骤虽然较多,但都较为简单,且可以将多边形模型转换为 NURBS 曲面模型,实现 NURBS 曲面的重构。由此可知,Geomagic Studio 软件可以获得高质量 NURBS 曲面模型且操作简便,能够满足虚拟人体的建模需求。

### 4.2 点云偏差结果

由于部分软件没有偏差评估功能,同时为了消除不同软件评估方式差异对评估结果的影响,文中研究统一使用 Geomagic Studio 软件的点云偏差功能对以上 3 种模型的精度进行计算。

将 Imageware 软件所建的模型(以下简称 I 模型)、Geomagic Studio 软件所建的模型(以下简称 G

模型)、MeshLab 软件所建的模型(以下简称 M 模型)以及前臂点云数据统一导入 Geomagic Studio 软件。通过最佳拟合操作,将 3 个曲面模型分别与前臂点云对齐,计算得到点云偏差结果,具体见表 2。表 2 中,最大正向、负向距离指噪声点的最大偏差距离;平均正向、负向距离指噪声点的平均偏差距离;标准偏差指模型与点云偏离的标准偏差值;RMS 值越低,表示模型的真实性和精度越好。以上数值均可用于数据精度的衡量。

一般情况下,模型的标准偏差不超过 0.05 cm<sup>[15]</sup>。经过计算可知,I 模型、G 模型、M 模型的标准偏差均在合理范围内。其中,利用 NURBS 曲面建模的 Imageware 软件虽然能够保证曲面拥有良好的光顺性,但曲线之间的过渡曲面不受点云约束,因此 I 模型的标准偏差较大。G 模型与 M 模型的标准偏差均小于 I 模型,由此可知多边形建模思路更适合构建曲率较大的复杂人体模型。G 模型的标准偏差与 M 模型相近且 G 模型的 RMS 值最小,表明 G 模型呈现出良好的几何精度。因此,将多边形建模与 NURBS 曲面建模相结合的 Geomagic Studio 软件的前臂曲面重建效果更好。

表 2 I 模型、G 模型、M 模型的偏差分析结果对比

Tab. 2 Comparisons of deviation analysis results of I model, G model and M model						单位:cm
模 型	指 标					
	最大正向距离	最大负向距离	平均正向距离	平均负向距离	标准偏差	RMS
I 模型	0.096 8	-0.159 5	0.019 4	-0.020 0	0.027 8	0.027 8
G 模型	0.301 7	-0.053 1	0.017 0	-0.005 2	0.023 2	0.024 4
M 模型	0.154 0	-0.100 0	0.020 0	-0.024 7	0.022 3	0.027 4

## 5 结 语

随着信息技术的日趋成熟,逆向建模软件也在不断发展。对于精度要求较高、曲率变化较大的虚拟人体模型,依据模型特点选择合适的建模方法是构建高质量模型的关键。文中通过分析 3 款软件建模原理、操作难度以及模型精度的差异,发现 Geomagic Studio 软件具有建模操作简便、模型质量高的特点,因此虚拟人体模型的构建可以着重考虑多边形建模与 NURBS 曲面建模相结合的建模方法。在今后的研究中,可以进一步验证该方法构建复杂人体部位(如头、手、脚)模型的效果,为三维人体模型的发展提供技术支持。

### 参考文献:

[ 1 ] 贾思珩. 逆向工程及快速成型的现状及发展趋势[J]. 数字通信世界,2019(11):124.

JIA Siheng. Current situation and development trend of reverse engineering and rapid prototyping [ J ]. Digital Communication World,2019(11):124. ( in Chinese )

[ 2 ] 杨明霞. 逆向工程造型关键技术解析[J]. 南方农机,2019,50(16):242-243.

YANG Mingxia. Analysis of key technology of reverse engineering modeling [ J ]. China Southern Agricultural Machinery,2019,50(16):242-243. ( in Chinese )

[ 3 ] LIU K X,WANG J P,ZHU C,et al. A mixed human body modeling method based on 3D body scanning for clothing industry[J]. International Journal of Clothing Science and Technology,2017,29(5):673-685.

[ 4 ] KULCZYK T,RYCHLIK M,LORKIEWICZ-MUSZYŃSKA D,et al. Computed tomography versus optical scanning:a comparison of different methods of 3D data acquisition for tooth replication[J]. BioMed Research International,2019(1):1-7.

[ 5 ] 杜剑侠,施国兴. 一种基于曲面建模与多边形建模的混合人体建模方法[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2008,33(3):49-52.

- DU Jianxia, SHI Guoxing. A hybrid method for virtual human modeling based on curved-surface modeling and polygon modeling [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2008, 33(3):49-52. (in Chinese)
- [6] 曾波, 刘佩森, 曾凤, 等. 基于 Imageware 涡轮叶片的逆向设计[J]. 机械设计, 2019, 36(增刊1):180-182.
- ZENG Bo, LIU Peisen, ZENG Feng, et al. Reverse design of turbine blades based on Imageware [J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(Sup.1):180-182. (in Chinese)
- [7] 王长伟, 唐瑞尹, 张敬, 等. 基于 Imageware 软件的 Bezier 曲面重构研究[J]. 机电信息, 2019(26):112-113, 115.
- WANG Changwei, TANG Ruiyin, ZHANG Jing, et al. Research on Bezier surface reconstruction based on Imageware software[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(26):112-113, 115. (in Chinese)
- [8] 刘震, 张盘德, 容小川, 等. 脑卒中踝足矫形器的 3D 打印研究[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(8):874-878.
- LIU Zhen, ZHANG Pande, RONG Xiaochuan, et al. A study of 3D printing for stroke patients specific ankle-foot orthoses[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32(8):874-878. (in Chinese)
- [9] 齐啸, 计忠平. 基于三维人体模型的尺寸测量和拟合[J]. 现代计算机, 2019(7):74-81.
- QI Xiao, JI Zhongping. Size measurement and fitting based on 3D human body model [J]. Modern Computer, 2019(7):74-81. (in Chinese)
- [10] SONI A, MODI Y K, AGRAWAL S. Computed tomography based 3D modeling and analysis of human knee joint[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11):24194-24201.
- [11] 谭伟林, 彭志强, 邓浩. 基于 Geomagic Design X 的玩具公仔逆向造型设计[J]. 南方农机, 2019, 50(23):99, 108.
- TAN Weilin, PENG Zhiqiang, DENG Hao. Reverse modeling design of toy figures based on Geomagic Design X [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(23):99, 108. (in Chinese)
- [12] 吴旭, 卢凌雯, 梁栋栋, 等. 基于点云数据的曲面重建算法比较研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(1):46-50.
- WU Xu, LU Lingwen, LIANG Dongdong, et al. Comparison of surface reconstruction algorithms based on point cloud data [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2019, 42(1):46-50. (in Chinese)
- [13] 周少山. 隐式曲面建模和体网格生成方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [14] 刘涛. 泊松隐式曲面重建算法及其并行化研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [15] 成思源, 杨雪荣. Geomagic Studio 逆向建模技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016:118.

(责任编辑: 沈天琦)