

逆向工程在大型雕塑制作中的应用*

王永信, 崔学龙, 梁 晋, 贾濯非, 欧阳振宇

(西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对传统大型雕塑制作过程中出现的各种难题, 提出了一种基于逆向工程技术的雕塑制作方案。首先, 采用近景摄影测量技术和三维光学面扫描系统相结合的方法进行数据采集, 再使用逆向设计软件 Geomagic 和计算机辅助设计软件 AutoCAD 完成三维数据处理, 最后将数据输出采用机械加工和传统工艺结合方式来完成最终的雕像成型。结果表明, 该方法有效地提高了雕塑创作效率、缩短了大型雕塑制作周期, 对未来雕塑领域的发展具有重要的指导意义。

关键词: 逆向工程; 雕塑制作; 数据采集; 数据处理

中图分类号: TB21

文献标志码: A

文章编号: 1007-4414(2013)01-0037-04

Application of reverse engineering in large-scale sculpture making

Wang Yong-xin, Cui Xue-long, Liang Jin, Jia Zhuo-fei, OuYang-zhenyu

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shanxi 710049, China)

Abstract: Against all sorts of problems appeared in the process of making large sculpture, a new sculpture-making method based on reverse engineering technology is proposed. Firstly, the datas are collected by combining the close shot photogrammetry technology and 3D optical surface scanning system. Secondly, 3D data processing is completed by using reverse design software Geomagic and computer aided design software AutoCAD. Finally, the datas are put out by combining mechanical processing and the traditional process. The result shows that this method can improve sculpture creation efficiency and shorten statue making cycle. The method is of significance in guiding the development of the sculpture field.

Key words: reverse engineering; sculpture making; data collection; data processing

1 引 言

逆向工程 (Reverse Engineering) 是 20 世纪 80 年代末期发展起来的一项先进制造技术。所谓逆向工程就是将已有产品模型或实物模型转化为工程设计模型和概念模型, 在此基础上, 对已有产品进行解剖、深化和再创造, 是已有设计的设计^[1]。如图 1 所示, 为逆向工程系统的流程, 主要由三部分组成: 物体表面数据获取、CAD 模型重建、产品制造成型。随着逆向工程技术研究的不断深入, 它在生产实际中的应用也越来越广泛, 不但可以参与新产品的设计、完成已有零件的模具设计, 还可用于磨损和损坏件的还原、产品质量检测等, 而且在快速原形制造中也有广泛应用。近年来随着生物、材料技术的发展, 逆向工程技术也开始应用在人工生物骨骼等医学领域^[2]。但是其最主要的应用领域还是在飞机、汽车、玩具和家电等模具相关行业。

众所周知, 目前, 大部分雕塑的制作和创作依然沿用传统的手工创作流程。在一些工艺流程的环节上效率十分低下, 从设计创意、制作手段一直到最终效果都在很大程度上受到传统工艺的制约, 特别是大

型户外雕塑工程的设计、施工、放大更是如此。此外, 一些现当代的作品要求技术工艺和视觉上更加复杂创新, 这就需要反复制作雕塑样稿, 不仅使雕像制作的劳动强度增大, 而且很难将原有的好想法保存下来, 容易造成缺憾和失误。

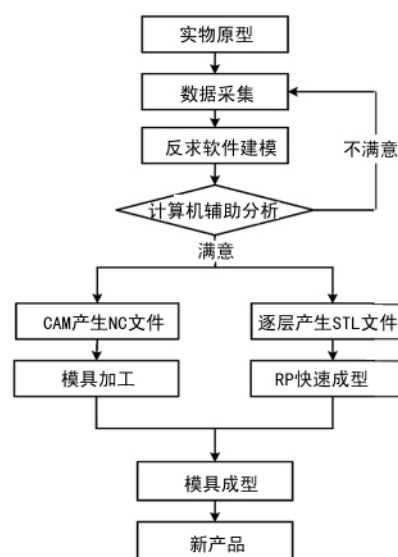


图 1 逆向工程的工作流程

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275378); 国家自然科学基金资助项目(51275389); 江苏省科技创新项目(SBC201210069)

收稿日期: 2013-01-05

作者简介: 崔学龙(1988-), 男, 山东德州人, 在读硕士, 主要从事三维光学测量、逆向设计等方面的研究。

2 基于逆向工程的大型雕塑制作方案

为了改变这一传统设计方法,满足大型雕塑创作中的某些特殊需求,本文将逆向技术理念引入到雕塑创作的过程中,利用三维虚拟设计、物理和虚拟空间匹配技术与传统雕塑技术相结合。此处以某大型雕塑为例,详细阐述利用逆向工程技术进行大型雕塑制作的步骤和方法。如图2所示,本文采用工业数字近景摄影测量技术^[3]和XJTUOM三维光学密集点云测量系统^[4]相结合的方法获取样件表面点云数据;针对大型雕塑样件点云数据量大、表面特征复杂的特点,采用专用逆向工程软件 Geomagic 和计算机辅助软件 AutoCAD 进行三维点云处理及面片整理工作,最后运用切片堆叠式机械加工和手工创作结合的手段快速、准确的完成雕塑制作成型。

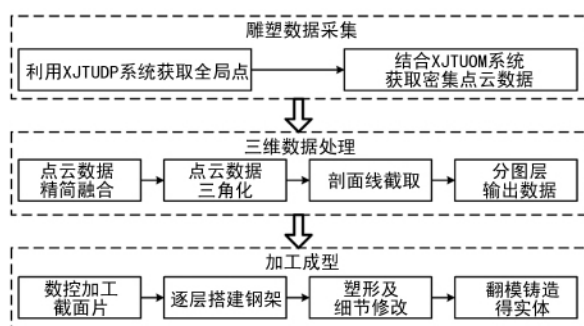


图2 基于逆向工程的大型雕塑制作流程

3 雕塑样稿的数据采集

数据采集作逆向反求技术中的第一环节,是后续数据处理、特征提取及模型重建的基础^[5]。目前采集的方式主要有三种:一是传统的接触式测量法;二是非接触测量法;三是逐层扫描测量法;如图3所示。其中接触式测量法精度高,但测量速度慢、采集数据密度低,不适用于测量形体复杂且体积较大的雕塑样品。针对大型雕塑不易搬动、数据采集量大,且表面细节多、特征复杂的特点,本文采用近景摄影测量技术与外差式多频相移三维光学面扫描技术相结合的方法,来快速、高效、准确的完成雕塑样稿的全尺寸数据采集。

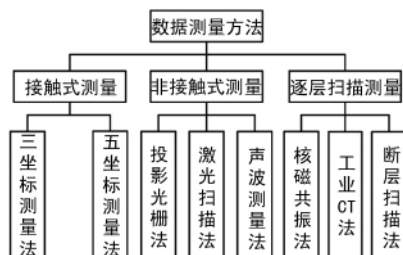


图3 逆向工程中数据采集方法

3.1 建立全局坐标点

所谓全局点就是在被测物体表面黏贴的用来辅助定位的标志点。得到这些点的空间三维坐标是后续点云数据采集的基础。

针对大型雕塑幅面大、局部特征复杂的特点,此处采用西安交通大学机械工程学院信息机电研究所研制的三维光学摄影测量系统——XJTUDP(如图4所示)来完成全局点位置的测量,测量精度应该可达到0.1mm/m。

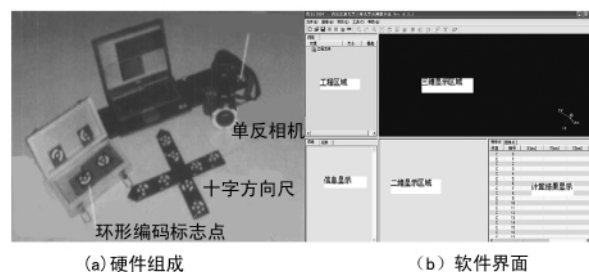


图4 XJTUDP 测量系统

该系统是基于数字图像处理技术和数字近景摄影测量技术,来实现物体表面结构特征点的精确三维重建的;即在物体的表面及其周围放置标志点(包括编码点和非编码点)和标尺,通过数字相机从不同的角度和位置对物体进行拍摄,获得一定数量的照片;然后采用基于最小二乘拟合的亚像素提取技术进行图像处理,得到标志点的编号和其中心的图像坐标;再利用单向空间后方交会和三维重建相关算法实现图像匹配和标志点的三维重建;最后采用光束平差算法来优化结果,以得到更高精度的物体特征点三维坐标^[6]。

$$V = A \times X_1 + B \times X_2 + C \times X_3 - L \quad (1)$$

全局点测量流程如图5所示,具体测量过程如下。

(1) 对被测物进行表面处理。考虑到物体表面材质、色彩及反光透光等都会对后期光学面扫描产生影响,因此,首先对泥塑雕像进行表面喷涂处理:注意适当距离均匀喷涂,尽量避免喷涂不均所带来的厚度偏差。喷涂完毕后放在通风地方进行自然风干。

(2) 进行现场布局。根据测量需求,在雕塑样稿表面粘贴一系列编码和非编码标志点,并放置标准比例尺。受雕塑尺寸较大的影响,应在泥塑周围也均匀布置编码点,以用来完成局部测量图片的全局匹配。

(3) 利用系统所配高精度数码相机从各个角度、不同高度拍摄上百张样稿照片,将所获图片导入到XJTUDP系统中,以计算出标志点的三维空间坐标。并利用XJTUDP系统中321坐标变换模块将所获点集的三维坐标 $\{G_i\}$ 统一调整到所需坐标系下。此处以雕塑周围的地面边缘作为作为 xy 平面,以鼻尖到

底面的垂线作为 Z 轴, 轴和 xy 平面的交点作为整个雕塑的坐标原点。

(4) 将测量结果导出并保存, 以作为后期使用 XJTUOM 系统时的全局拼接基准。

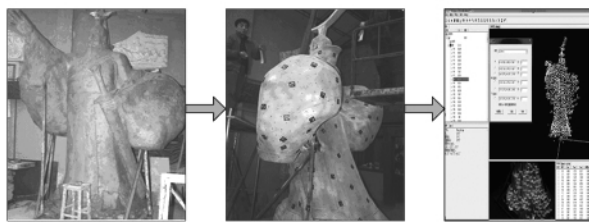


图 5 全局点测量流程

3.2 点云数据采集

为了快速、准确的完成雕塑样稿表面数据采集, 这里采用西安交通大学信息机电研究所研制的三维光学面扫描系统——XJTUOM, 该系统的测量精度可达 0.05mm 。如图 6 所示, XJTUOM 系统依据外插式多频相移技术原理, 结合计算机立体视觉, 通过光栅投影装置投影数幅特定编码的结构光到待测物体表面, 并由成一定夹角的两个摄像机同步采集光栅条纹图像, 然后利用条纹莫尔特性的解相方法对图像进行解码和相位计算, 其中投影光栅上某一点的物体上的偏移距离 b 由下面公式求得:

$$b = \frac{p}{2\pi} \Delta\varphi \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为相位差, 由相位调制函数求得; p 为条纹周期。

由三角形测量法求出物体表面上该点的高度值 z :

$$z = \frac{bl}{D+b} = \frac{pl}{2\pi D} \Delta\varphi \quad (3)$$

式中: D 为相机和投影仪间的距离; l 为相机和投影仪所在直线与该点之间的距离。再经立体匹配和三维重建计算出两相机公共视区内点的三维坐标, 从而实现被测物体的三维信息数字化。

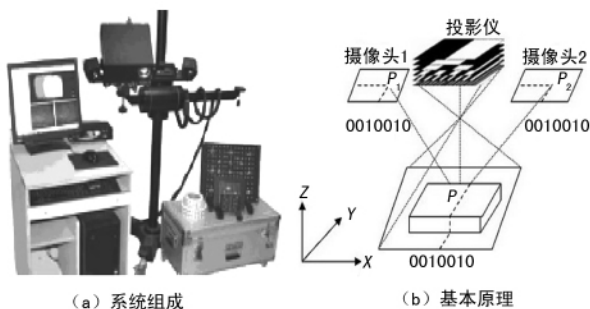


图 6 XJTUOM 三维光学面扫描系统

鉴于被测雕塑幅面较大, 同时又兼有造型复杂的细节, 本文采用分区域扫描的方法, 最后根据本区域

内的全局坐标点, 将所获点云自动拼接到统一的坐标系下。具体流程如下。

(1) 区域划分。此处按雕塑表面细节的复杂程度分为头部、左手部、右手部、雕塑腰部以上、雕塑腰部以下 5 个部分。

(2) 采用 XJTUOM 三维光学面扫描系统进行区域扫描。按照所划分区, 分别建立 5 个 xjtum 工程; 每个工程进行扫描之前, 要先导入 xjtudp 所获的全局点, 以作为多幅局部扫描数据的拼接基准, 后利用 xjtum 系统一次扫描 $300\text{mm} \times 400\text{mm}$ 区域的密集点云, 自动注册到全局点所确定的坐标系下; 多次扫描完成雕塑外形轮廓的密集点云采集, 如图 7 所示。

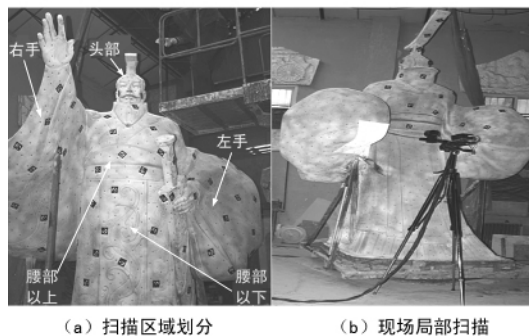


图 7 点云数据采集

(3) 将上述 5 部分点云数据合并到一起。因每部分数据都注册在全局点所确定坐标系下, 所以最终合并后的点云位于统一的坐标系下。该坐标系以雕塑底面作为 xy 平面, 以鼻尖到底面的垂线作为 Z 轴。此外, 针对局部缺失的细节, 须再利用扫描设备进行补充扫描。最后将合并后的点云数据导出并保存为 * ply 格式。

4 三维数据处理

首先利用逆向设计软件 Geomagic studio 对扫描获得的雕塑点云数据进行处理^[8], 包括点云数据处理、三角化和剖面线截取 3 个阶段。

(1) 点云数据处理阶段 将扫描所获的最终点云以 * ply 格式导入 Geomagic studio 软件中, 由于在测量过程中不可避免的引入了噪声, 同时采集数据时会出现扫描区域重合的现象, 因而要对所获点云数据进行降噪、融合处理。之后在不影响建模精度的前提下, 对海量点云数据进行抽稀以提高处理速度, 如图 8 所示。

(2) 三角化阶段 将最终处理完毕的点云进行封装后, 即切换到了 Geomagic studio 的三角化阶段。在此阶段主要进行缺失数据补充、移除相交三角面片、网格平滑和修改边界特征等, 最终得到理想的多边形模型。如图 9 所示。

数据处理完毕,按照工程实际要求,要将虚拟造型进行等比例放大成型。此处利用 Geomagic studio 的缩放功能将原始模型放大到最大高度 5m。



图8 点云数据处理

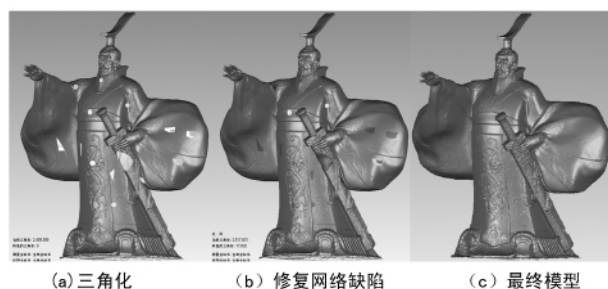


图9 点云封装三角化处理

(3) 剖面线截取 利用 Geomagic studio 的截线功能创建雕塑模型的平行轮廓线。截线数目越多,雕塑的细节位置形态就越明显,但是这会增加后期制作和数控加工的工作量,因此要根据具体情况计算出最佳的截面线数目。考虑到雕塑的头部及手部细节多而复杂的特点,在头部和手部截面线剖切的密度大些,如图 10 所示。以底面作为剖切 0 面,沿 Z 轴正方向以一定间隔(头部和手部截线间隔要变小)依次剖切完毕后,输出剖切截面曲线并保存为 IGS 格式。

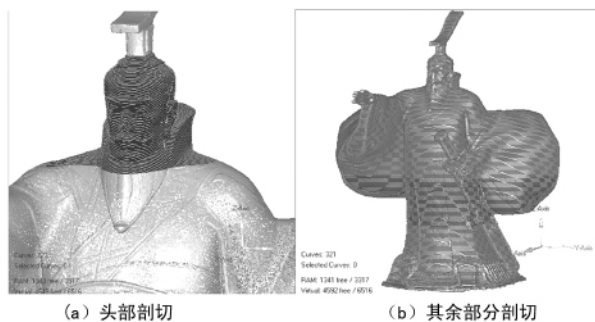


图10 数字模型剖切

将所有剖面线导入到 AutoCAD2012 中,利用软件的图层功能建立多个图层并以剖切截面线的 Z 坐标命名,后将每条剖面线移动到相应的坐标图层下,再于当前图层画控制网格,如图 11 所示。

最后分图层输出数据。为避免后期出现装配错误,将每个剖切面的截线和控制网格同时输出为可以用于工程加工的二维图纸,每张二维图纸按照它的 Z 坐标进行单独命名。

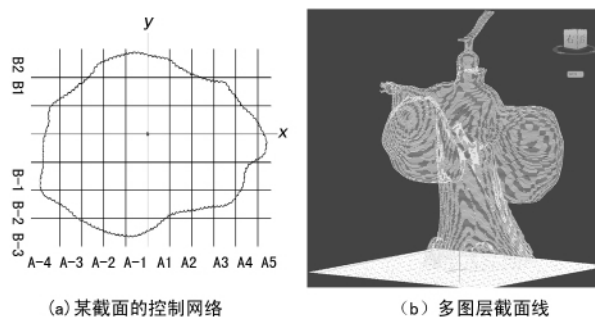


图11 采用 AutoCAD 进行截面线处理

5 雕塑制作成型

此处采用数控加工和手工创作结合的方法进行雕塑制作。首先将图层数据导入到数控机床,加工出所有截面片;之后开始搭建结构框架,考虑到大型雕塑的重量,须根据雕塑模型的结构和内部位置关系,逐层搭建钢架、安装截面片,以避免雕塑产生形变;再经过上大泥、塑形、细节修改等雕塑大型就完成了^[8]。后续要做的工作是翻模铸造,最终得到铸铜雕塑,如图 12 所示。



图12 雕塑加工成型

6 结论

传统大型雕塑制作周期长、费用高,而且制作难度大,技术要求严格,加工工艺复杂;为此,本文将逆向工程技术应用到了雕塑创作过程中,从基于非接触式光学测量技术的精确数据采集,到三维造型设计软件的快速数据处理,再到机械加工与传统工艺结合的雕塑成型方式,这些都很好地协助雕塑家更精确、更便捷地完成了大型雕塑的快速制作。实践证明,逆向技术理念的介入,不仅使雕塑模型的修改变得简单,大大降低了大型雕塑制作成本,缩短了雕塑制作周期,还可将雕塑的三维数据资料保存下来,为将来的分析和研究工作提供强有力的理论依据。

(下转第 43 页)

2.3 提环销

提环销的材料为 40CrNi2MoA, 屈服强度 $\sigma_s \geq 585\text{MPa}$, 材料抗拉强度 $\sigma_b \geq 760\text{MPa}$, 伸长率 $\delta_4 \geq 16\%$, 断面收缩率 $\psi \geq 45\%$ 。

按照提环销的设计图纸, 在三维设计软件 NX7.5 平台上, 建立提环销的三维模型图, 图 8 是利用该设计软件生成的提环销三维模型渲染图。为看清内部结构, 图中略去尺寸标注。

图 9 所示为该模型承受载荷示意图。提环销左右两端圆周面上受到向上的拉力为 151.5t, 中间部位的圆周面上受到向下的拉力为 303t。

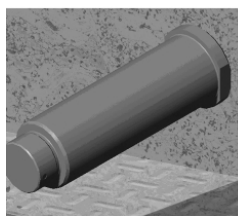


图 8 模型渲染图

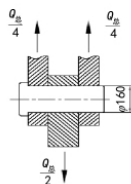


图 9 载荷示意图

由剪切应力公式可得:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14 \times 160^2}{4} = 20096 (\text{mm}^2)$$

$$\tau = \frac{Q_{\text{总}}}{2 \times 2A} \times \frac{4}{3} = \frac{4 \times 6058300}{12 \times 20096} = 100.5 (\text{MPa})$$

$$n = \frac{0.58 \times 585}{100.5} = 3.38$$

2.4 耳板

耳板的材料为 MS-7408, 屈服强度 $\sigma_s \geq 350\text{MPa}$, 材料抗拉强度 $\sigma_b \geq 490\text{MPa}$, 伸长率 $\delta_4 \geq 18\%$ 。

按照耳板设计图纸, 在三维设计软件 NX7.5 平台上, 建立了耳板的三维模型图, 图 10 是利用该设计软件生成的耳板三维模型渲染图。图 11 是笔者进行

分析的 3 个危险截面。

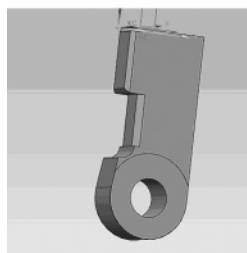


图 10 模型渲染图

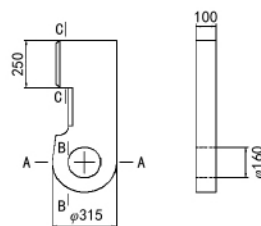


图 11 3 个危险截面

经力学分析得出 3 个危险截面的应力值分别为:

A-A 断面: $\sigma = 146\text{MPa}$, $n = 2.39$

B-B 断面: $\sigma = 55.7\text{MPa}$, $n = 3.64$

C-C 断面: $\sigma = 60.6\text{MPa}$, $n = 3.35$

3 结果分析

经过材料力学计算与有限元分析可知, YC585 游车主要承载零件的安全系数都达到了 2.25 以上, 完全符合 API Spec 8C 规范 [3] 的要求, 其在安装方面有较传统 450t 级的游车也有很大的改进, 提高了工人的工作效率。

4 结 语

随着钻井技术不断的进步, 大钩、水龙头逐渐可被顶驱取代, 而游车作为游动系统的灵魂将始终扮演着重要的角色, 但因深井钻机的不断出现, 游车的负载越来越大, 这给游车的设计带来了很大困难, 设计人员就需从新材料、新结构等方面入手, 寻求更好的解决方案。

参考文献:

- [1] 杜庆华. 材料力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1961.
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册 [M]. 北京: 化工出版社, 1981.
- [3] API SPEC 8C 钻井和采油提升设备规范 (PSL1 和 PSL2) [S].

(上接第 40 页)

参考文献:

- [1] 刘伟军, 孙玉文. 逆向工程原理·方法及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 何叶松, 杨华哲, 单晶心, 等. 逆向工程在重构腕关节骨 CAD 模型中的应用 [J]. 中国医学物理学杂志, 2011(1): 2378-2381.
- [3] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [4] 梁 晋, 肖振中, 臧顺来, 等. 外差式多频相移技术的三维光学点云测量研究 [J]. 锻压技术, 2008, 33(1): 143-147.

- [5] 李志新, 黄曼慧, 成思源. 逆向工程技术及其应用 [J]. 现代制造工程, 2007(2): 58-60.
- [6] 张德海, 梁 晋, 唐正宗, 等. 大型复杂曲面产品近景工业摄影测量系统开发 [J]. 光电工程, 2009(5): 122-128.
- [7] 梁 晋, 肖振中, 刘建伟, 等. 大型飞机三维光学快速测量建模关键技术研究 [J]. 中国机械工程, 2009(6): 648-651.
- [8] 丁恩伟, 蔡 勇, 梁 晋, 等. 基于 Geomagic 和 UG 的快速参数化逆向建模方法 [J]. 机械研究与应用, 2012(3): 173-175.
- [9] 刘 鹏. 雕塑语言在角色建模中的探索与应用 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.