

牛蹄三维几何模型逆向工程研究

李世武, 佟金, 张书军, 陈秉聪

(吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 利用 3D SCANNER 扫描测量仪对单个牛蹄角表面进行扫描, 获取了三维点群数据。利用逆向工程软件 Surfer 进行了去除噪声、光滑、拼接等点群初步处理, 采用直接用特征曲线生成曲面的方法重构了牛蹄角的三维几何模型。对重建的三维几何模型与原始点群之间的误差进行了分析, 为将逆向工程技术应用到工程仿生领域定量研究动物步行足三维几何特征及松软地面仿生步行技术的发展提供了一定的基础。

关键词: 逆向工程; 工程仿生; 牛蹄; 几何特征描述

中图分类号: TG452; TH142

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)02-0156-05

0 引言

轮子作为车辆的常规行走机构, 在硬路面上具有优良的行驶性能, 但在松软地面上发生下陷、打滑, 甚至无法行驶。然而, 牛、马、骆驼等软地行走动物进化出适于松软地面行走的腿和蹄(足)结构和功能, 在松软地面上具有优良的行走通过性能, 已成为仿生步行轮和仿生轮胎的学习对象, 由此发明的仿生步行轮在水田作业可提高拖拉机牵引效率 17%^[1], 研制的仿生轮胎可明显改善车辆在沙地上的行驶通过性^[2]。工程仿生技术可大致分为两步: 第一步是针对工程技术问题, 研究相应生物的结构、形态、行为或生命过程, 揭示其特征原理; 第二步是将生物系统转化为工程系统, 定量认识某些软地行走动物蹄的结构, 对于土壤机具系统仿生设计具有指导意义。逆向工程技术^[3]的发展为定量描述软地行走动物蹄的结构提供了三维表面测量及数字化模型设计方法。

由于长期的能量和信息交换使牛蹄形成了适于在松软地面上行走且具有低的行走阻力的外形曲面形状。牛蹄的几何形状是不规则的, 它比工程领域内许多零部件的几何外形要复杂得多。从几何造型的角度来看, 整个牛蹄虽然浑然一体, 但是却很难用一张曲面来构建, 需要由一些曲面片拼合而成, 因此牛蹄同时具有组合复杂性。牛蹄具有的几何复杂性和组合复杂性使其很难用常规方法进行定量描述, 逆向工程技术为复杂曲面体特别是自由曲面体三维测量及模型重构提供了可能。逆向工程技术是针对已有物体, 利用 3D 数字化测量仪器准确、快速地测量轮廓坐标值, 并构建曲面, 经过编辑、修改后, 将图档转至一般的 CAD/CAM 系统, 再由 CAM 所产生的刀具的 NC 加工路径送至 CNC 加工中心制作模具, 或者以快速成型机将样品模型制作出来^[3-5]。

1 牛蹄角外型面三维数据获取

牛蹄由两个蹄角组成, 整体测量时两蹄角之间的缝

隙内部无法扫描, 因此, 本文只研究单个牛蹄角。

针对牛蹄角外形尺寸较小、曲面较复杂的特点, 采用非接触式的激光测量法进行三维几何测量。测量设备为 3D SCANNER 激光扫描仪, 其主要参数: 最大扫描体积: 550 mm × 450 mm × 450 mm, 扫描精度: 0.2 mm。

牛蹄角的几何复杂性使得进行几何测量时扫描角度的选取比较困难, 很难从一个角度扫描获得全部的外形特征, 扫描时只能根据研究者的具体需要来选取扫描角度, 一次只能针对一个表面进行扫描, 扫描完成后再拟合成一个整体。因此, 根据牛蹄角的几何形状制做了固定支架。采用标准球作为参考点, 即在牛蹄角固定支架上安装 3 个直径 30 mm 的标准球, 保证在支架转换各角度扫描牛蹄时每次都可同时扫描到这三个标准球。固定支架结构及标准球安装示于图 1。支架可任意翻转, 以方便转换各种角度进行扫描。牛蹄角用尖头针固定在支架上。牛蹄角的颜色为暗黑色。依据测量要求, 采用着色渗透探伤剂—显像剂(DPT-5)对牛蹄角表面进行喷涂着色处理。图 2 为着色处理前、后的牛蹄角图片。

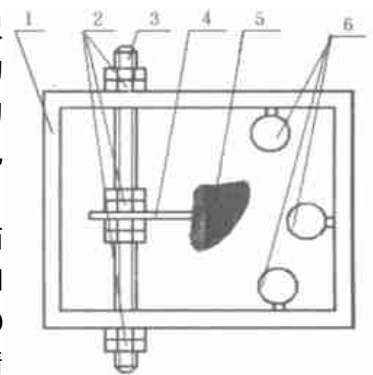


图 1 三维扫描用支架结构及标准球安装示意图

Fig 1 Sketch map of bracket and standard sphere used in scanning

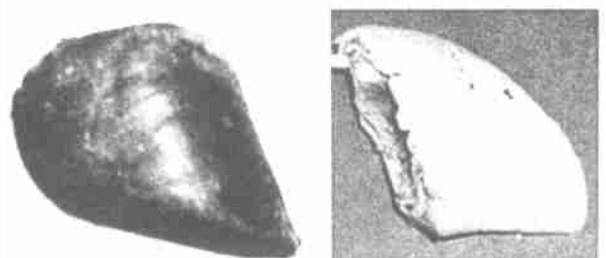


图 2 着色处理前后的牛蹄角图片

Fig 2 Cattle hoof picture before and after being colored up

收稿日期: 2003-07-26 修订日期: 2003-10-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50025516); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20010183024)

作者简介: 李世武(1971-), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为工程仿生与逆向工程技术。长春 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 130025。Email: lshw i@163. com

采用“VOLUME SCAN”方式从不同角度对牛蹄角扫描, 扫描后的点群文件用*. ris 格式保存。图 3 和图 4 分别是两个不同角度扫描得到的牛蹄角原始点群。

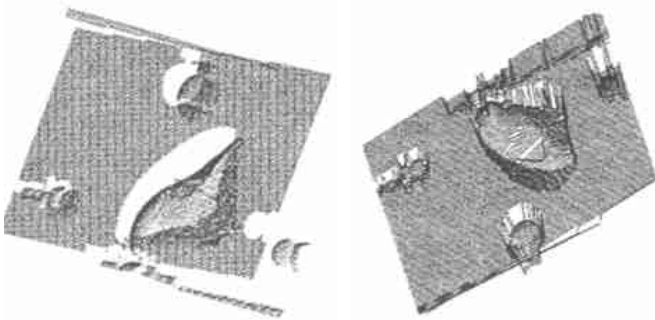


图 3 以 scatter 方式显示牛蹄角原始点群

Fig 3 Cattle hoof original point clouds displayed with scatter mode

图 4 以 polyline 方式显示牛蹄角原始点群

Fig 4 Cattle hoof original point clouds displayed with polyline mode

2 点群数据的初步处理

数据初步处理, 即对点群的初步处理, 如噪声去除、过滤、光滑、网格化等。数据处理是逆向工程中的关键环节, 它的结果将直接影响到后期模型重构的质量^[5]。针对牛蹄角外型测量获得的散乱点群数据, 可应用多种软件进行处理, 如美国 Imageware 公司的逆向工程专用软件 Surfacer、台湾智泰科技公司的逆向工程专用软件 DigiSurf 等。考虑到软件 Surfacer 的成熟性及多功能性, 采用 Surfacer 进行牛蹄角的三维几何模型重构。

2.1 删除散乱点群噪声数据

扫描获取的每一个点群中, 都包含许多噪声如支架、垫铁、实验台底面等, 并在牛蹄角周围存在由于光线散射等原因形成的毛刺(见图 3 和图 4), 这些噪声在进行各种点线面处理之前应将其删除。将点群放大、变换各种角度以方便地看到整个三维空间内的噪声, 然后针对各个噪声点采用软件中的“删除”功能将其删掉。图 5 为删除噪声后的牛蹄角部分曲面点群(以 Polyline 形式显示, 不包含标准球), 图 6 为包含标准球的单个点群。



图 5 不包括标准球的单个牛蹄角点群

Fig 5 Cattle hoof point clouds without including standard sphere

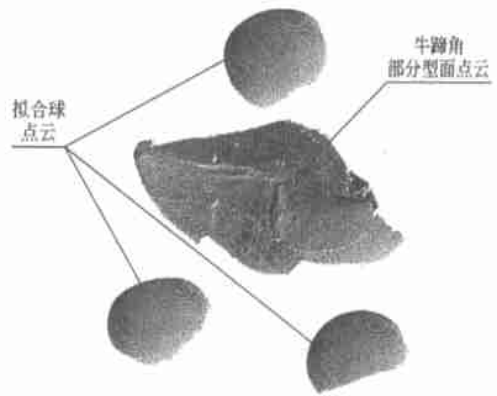


图 6 包括标准球的单个牛蹄角点群

Fig 6 Cattle hoof point clouds including standard sphere

2.2 点群的精简

在逆向工程技术中采集点的数量一般都很大, 在进行牛蹄角三维数据扫描时, 如选择扫描间隔为 0.2 mm, 则扫描一个曲面点群的点数大约为 6~10 万个, 如此庞大的数据需要在曲面重构之前进行精简处理, 以提高运算速度。本工作采用取样法进行精简处理。取样法是利用取样的方法对选定的点群进行点群精简, 一般可以选用两种方式: “Scan Interval”取样法和“Point Interval”取样法。若所采集的点是网格或扫描方式获取的, 则可采用“Scan Interval”方式, 沿网格或扫描方向, 每隔若干个选取一保留点对点群进行精简, 例如, 选定扫描间隔为 3, 则每 3 个点中只有最后一个点被保留下来, 其余两个点都被精简掉; 若点群为其它形式, 则可采用“Point Interval”精简方式, 用去除领域点的方法对点群进行精简。图 7、图 8 为采用“Point Interval”取样法精简后的点群。针对图 7 而后图 8 所示的点群, 当选择 Point Interval 为 3 时, 点的数量由 9693 减少至 3365, 减少了 65%; 当选择 Point Interval 为 5 进行精简时, 点的数量由 9693 减少至 2103, 减少 78%。点的数量的大大减少, 有利于提高下一步的运算速度。

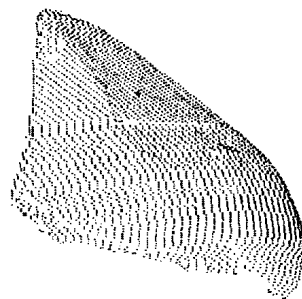


图 7 精简后的牛蹄角部分点群(Point Interval: 3)

Fig 7 Cattle hoof point clouds after sampling (Point Interval: 3)

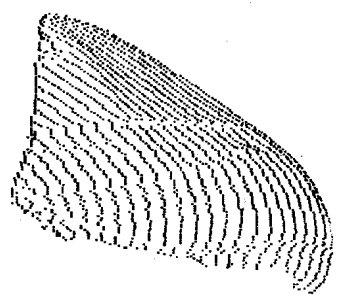


图 8 精简后的牛蹄角部分点群(Point Interval: 5)

Fig 8 Cattle hoof point clouds after sampling (Point Interval: 5)

2.3 散乱点群的光滑处理

经过去除噪声、精简处理后的牛蹄角点群上仍存在一定的数据异常点, 如一些尖锐部位, 应进行光滑处理。本工作采用一般过滤法对牛蹄角单个点群进行光滑处理。一般过滤法可以根据特定的过滤器对点群数据进行

光滑处理,可选择使用的过滤器主要有三种:高斯模式、平均模式和中值模式。高斯模式过滤器可以将点群中的变动较大处的点平滑掉,该方法用于处理噪声数据的效果较好;平均模式过滤器通过采用指定点群的统计平均值而将错误数据点平滑掉;中值模式过滤器主要通过采用指定点群数据统计中值来平滑点群,此方法可以将远离点群的数据点平滑掉。图9为采用高斯模式光滑处理后的点群。对于网格数据点群,过滤器将根据指定的模式为点群上每一个点计算一个新的坐标值。如果点群没有网格化,该功能将假定数据按照某一方式(如扫描直线)进行有序化,然后再应用过滤器修改坐标值。进行过滤处理时以周围相邻点的坐标来确定是否替换该点,过滤时不减少扫描线的边界,也不改变裂缝的形状。

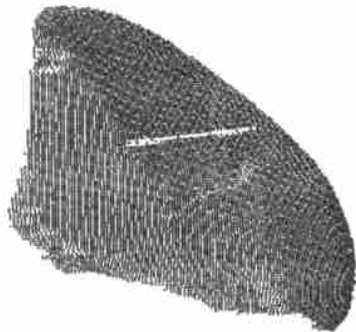


图9 光滑处理后的点群(Gaussian Filter Type: 7)
Fig 9 Cattle hoof point clouds after smoothing
(Gaussian Filter Type: 7)

2.4 点群的拼接

由于牛蹄角形状复杂,一次扫描无法获得全部数据,进行多次扫描时不免需要将牛蹄角作移动以实现完整点群的获取,这将会造成输入软件时数据产生坐标不统一的现象,需要进行坐标定位。现有的逆向工程软件,其坐标定位方法大致可分成两种:一种是利用基本像素来达到定位效果,其做法是在待测物上粘上球体或利用待测物体上一些基本像素,例如圆柱面、球面、平面等。当点数据被获取下来后,分割出这些基本像素的点群,并利用拟合的功能将这些近似球体或平面的点数据像素近似求解出来,然后根据相同位置的球体其圆心必在同一点(三点定位)等类似的条件将点数据定位。利用标准球心定位还可以减少由于牛蹄角表面的喷漆所造成的误差。另一种方法为选取预整合的点群数据中数据重叠的部分,然后自动运算该区域曲率变化的方式,将不同数据中应整合的相同区域作运算并整合,所选取的区域数目越多,整合的精度就越高。若所选取的区域有较大的曲率变化,则整合的准确率也高。

本工作对牛蹄角的多个点群数据拼接时采用了基本像素中标准球定位的方式。首先针对每一个点群中的标准球点群进行拟合,获取3个球心;再将不同角度下扫描到的点群,依靠标准球的球心将其拼接到一起,形成一个点群。由于扫描时在边界处激光线难以扫描到,点群拟合后会缺少部分点群。因此,需要进行再次补充扫描,获取全部点群后再次进行拟合,获得完整的外型曲面点群。图10为缺少部分点群的牛蹄角,图11为补

扫描后拼接拟合形成的整个牛蹄的点群。

3 牛蹄角三维几何模型重构

Surfacer 软件提供了基于NURBS 曲线/曲面建模的环境,其核心是NURBS 拟合算法,借助此算法可以对数据点群拟合,从而实现基于测量数据曲面的重构。



图10 缺少部分点群的牛蹄角
Fig 10 Cattle hoof point clouds losing many points



图11 补充扫描后拟合成完整的牛蹄角点群
Fig 11 Cattle hoof point clouds after next scanning

针对牛蹄角的几何特殊性,结合软件 Surfacer 的功能,本工作采用该软件所提供的多种曲面拟合方法,如直接由点群生成曲面、直接由特征线生成曲面、由分割面拼接成曲面、曲面延伸后生成拼接曲面以及由曲线相连再生成曲面等方法分别对牛蹄角外型曲面进行了重构,最后确定使用直接由特征线生成曲面的方法对牛蹄角进行曲面重构。曲面重构时首先将拼接后的牛蹄角点群移动、旋转 to 适当位置,利用曲线功能 Curve | Construct 3D | Interactive 3D B-Spline 画一条三维直线,沿此直线利用功能 Points | Cross Sections | Parallel 截取牛蹄角点群,获得牛蹄角的截面曲线点群,再利用曲线拟合功能,获得牛蹄角的截面特征曲线。理论上而言,截取点群所形成的牛蹄角截面特征曲线,可以直接用 Surface | Create w/ Curves | Loft Curves 功能将其拟合成牛蹄角三维几何曲面模型,但是由于利用此功能进行拟合时需要考虑到截面曲线的起始点和方向,如果曲线的起始点、方向不一致,将会造成曲面变形、扭曲现象。因此,在进行整体曲面拟合之前,必须调整截面特征曲线的起始点、方向,使其达到一致。

由于从截面点群拟合特征曲线时每条曲线方向的形成是软件内部按照某一规律自动产生的,各条曲线的方向明显地不一致。软件 Surfacer 提供了专门进行方向调整的功能 Curve | Modify | Reverse Direction。进行曲线方向调整时,首先将需要调整方向的一组截面特征曲线旋转到合适的位置,此时应清楚看到所有曲线的方向,选定一个方向作为所有曲线的方向,然后查看每条曲线,如果该曲线的方向与选定方向不同,就选中该曲线用上述功能将其方向改变。针对每条曲线进行判定,最终可获得一组方向一致的截面特征曲线组。图12为方向调整前后的截面特征曲线。

同理,由于从截面点群拟合截面特征曲线时每条曲线起始点位置是软件自动确定的,明显地各起始点散乱

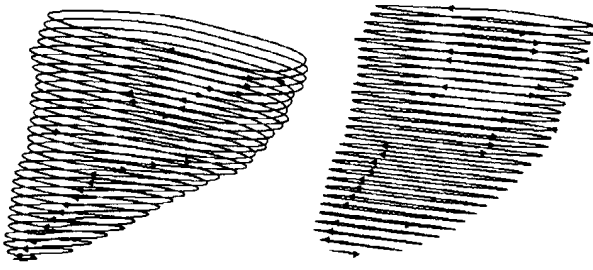


图 12 方向调整前(左)、后(右)牛蹄角截面特征曲线
 Fig. 12 Cattle hoof section characteristic curves before and after adjusting directions

分布在曲线各不同位置。起始点位置不一致也会造成牛蹄角曲面的扭曲。因此必须调整各条曲线的起始点位置,使其一致。软件 Surfacr 提供了专门进行起始点位置调整的功能 Curve | Modify | Change Start Point。图 13 为起始点位置调整前后的牛蹄角截面特征曲线。

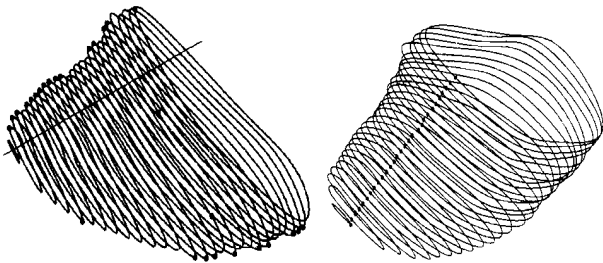


图 13 起始点位置调整前后的牛蹄角截面特征曲线
 Fig. 13 Cattle hoof section characteristic curves before and after adjusting original points position

将曲线的方向、起始点位置都修改一致后即可采用功能 Surface | Create w /Curves | Loft Curves 进行曲面拟合。该功能主要是利用一组独立的 3D 曲线创建一个 NURBS 曲面。首先选中需要拟合的所有曲线,然后选择是否拟合封闭曲面、是否指定控制点数目。如果选中封闭曲面选项,将产生一个封闭的曲面,但此时后面的连续性选项则不可使用,此时可通过两侧的边界用匹配功能 (Matching Features) 来控制曲面的走向;如未选中封闭曲面,则可继续选择起始点的连续性,有位置连续、曲率连续、切面连续、指定切线等四种方法供选择;选择切线的方向;选择结束点的连续性,也有位置连续、曲率连续、切面连续、指定切线等四种方法供选择;最后进行曲面拟合。拟合后的曲面一般在 V 方向是三阶的,在 V 方向上控制点的数目一般是 $n+2$ (n 为所选择的曲线的数量)。如果指定的曲线控制点数量不足以达到所指定的与相邻曲面的连续性,则软件会自动插入一些控制点以此达到所需的连续性。图 14 和图 15 为最后拟合得到的牛蹄角外型曲面。

4 牛蹄角三维几何模型误差分析

利用 Surface | Create w /Curves | Loft Curves 进行曲面拟合时,软件自动加入了一些拟合算法^[6],使得所拟合的曲面光滑性明显优于实际的扫描点群,有利于进一步的机械加工。但是对于牛蹄角表面的一些特征,如

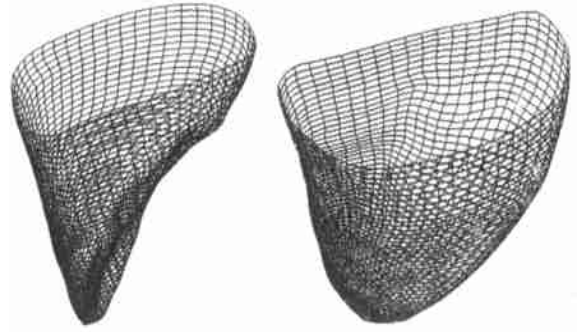


图 14 牛蹄角外型曲面(以 Curve Mesh 方式显示)
 Fig. 14 Cattle hoof exterior configuration model (displayed in curve mesh mode)

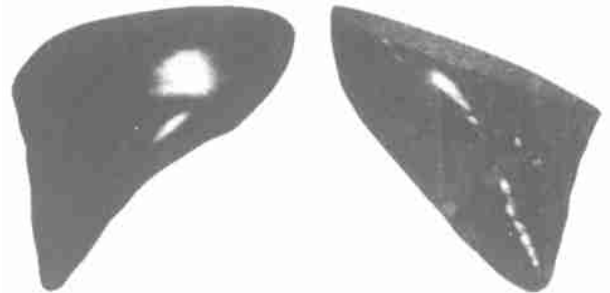


图 15 牛蹄角外型曲面(以 Gouraud-shaded 方式显示)
 Fig. 15 Cattle hoof exterior configuration model (displayed in gouraud-shaded mode)

小的突起、凹坑等,已经被软件自动平滑掉,所以重构后的曲面与原始点群之间有一定的误差,应对牛蹄角三维几何模型重构进行误差分析,以便对整个建模工作进行评价。图 16 为牛蹄角三维曲面与原始点群的误差分析针状图,针的长短代表该点处曲面与原始点群之间误差大小,针的比例可以在软件中设定。表 1 为牛蹄角三维曲面与原始点群之间的误差分析统计。



图 16 牛蹄角三维曲面与原始点群的误差分析针状图
 Fig. 16 Error map in needle between cattle hoof exterior configuration model and original points

由图 16 及表 1 可看出,牛蹄角重构后所形成的三维几何模型与原始扫描点群之间仍具有一定的误差,特别是在牛蹄角的底部与地面接触部分,原因在于牛蹄角底部具有角质层,扫描前存在破损及尖锐部分,该点处的点群应该作为异常点去掉。

表 1 牛蹄角三维曲面与原始点群误差分析统计

Table 1 Error statistic map between cattle hoof exterior configuration model and points

误差类型	最大值	平均值	标准值
正向误差	1.13544	0.09715	0.10487
负向误差	-4.95254	-0.10020	0.18875
欧几里得误差	4.95254	0.09860	0.15068
横向误差	0.00902	0.00031	0.00044

5 结论

1) 采用 3D SCANNER 激光扫描测量仪获取了牛蹄角三维几何曲面点群数据,确定了利用逆向工程软件的牛蹄角散乱点群噪声数据的删除、点群的精简、点群的光滑处理及点群的拼接等方法。

2) 基于逆向工程技术重构了牛蹄角三维几何曲面模型,该模型并非简单地忠实于原始点群,两者之间存

在一定误差。

3) 重构牛蹄角三维几何曲面模型为进一步定量分析牛蹄角的三维外型特征行为及其仿生应用提供了一定基础。

[参 考 文 献]

- [1] 杨文志, 罗 哲, 宁素俭, 等. 步行轮及步行轮拖拉机试验[J]. 农业工程学报, 1994, 10(2): 147- 152
- [2] 李 杰, 庄继德, 魏 东. 沙漠用仿驼蹄轮胎的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 32- 36
- [3] 许智钦. 逆向工程技术[J]. 北京: 中国计量出版社, 2002
- [4] Tamas Varady, Ralph R. Martin, Jordan Cox, Reverse engineering of geometric models-an introduction [J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255- 258
- [5] Liang Shuh-Ren, Lin, Alan C. Probe-radius compensation for 3D data points in reverse engineering[J]. Computers in Industry, 2002, 48(3): 241- 251
- [6] Kruth J P, Kerstens A. Reverse engineering modelling of free-form surfaces from point clouds subject to boundary conditions[J]. J Mater Process Tech, 1998, 76(1- 3): 120- 127

Three-dimensional geometrical modeling of the exterior configuration of a cattle hoof by reverse engineering technology

Li Shiwu, Tong Jin, Zhang Shujun, Chen Bingcong

(The Key Laboratory of Terrain Machine Biomechanics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Geometrical surfaces of a single cattle hoof was measured on a 3D scanner and their point clouds were obtained. The point clouds were, preliminarily, dealt with by software Surfacer, including the wipe-out of the interferential points, the simplification, the smoothing and the linkage of the point clouds. The three-dimensional exterior configuration model was reconstructed through generating the curved surface directly using characteristic curves. The errors between the three-dimensional exterior configuration model reconstructed and point clouds obtained by software Surfacer were analyzed. This work laid a basis for the animal hoof three-dimensional exterior configuration and development of the biomimetic walking technique in soft terrain machinery.

Key words: reverse engineering; engineering biomimetic; cattle hoof; describing geometrical shape