

# 典型逆向工程 CAD 建模系统的比较\*

余国鑫,成思源,张湘伟,赖茶秀

(广东工业大学 机电工程学院,广东 广州 510090)

**摘要:**点云处理、特征提取与曲面建模、逆向曲面质量评价及对下游工程的影响分析是逆向 CAD 模型重构中的几个关键环节。目前典型的商用逆向 CAD 建模系统可以分为专用逆向软件和提供逆向处理模块的正向软件两类,两者在模型重构上有着各自的特点。以这两类软件的典型代表 Imageware 和 Pro/Scan-tools 为对象,针对逆向 CAD 模型重构的关键环节,对两者的特点进行了较详尽的比较和评述,并在此基础上进行了总结。

**关键词:**逆向工程;CAD 建模;Imageware;Pro/Scan-tools;点云处理;特征提取

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2354(2006)12-0001-03

逆向工程(RE)三维 CAD 模型重构是后续产品加工制造、快速成型、工程分析和产品再设计的基础。伴随着逆向工程及其相关技术理论研究的深入进行,其成果的商业应用也日益受到重视,涌现出了大量的商业化逆向工程 CAD 建模系统。当前,市场上提供了逆向建模功能的软件达数十种之多,但大致可以分为两类:一是专用的逆向软件,如 Imageware, Geometric, Polyworks, CopyCAD, ICEMSurf 和 RE-Soft 等;二是提供逆向处理模块的正向 CAD/CAE/CAM 软件,如 PTC 的 Pro/Scan-tools 模块、UG 的 Point cloudy 功能等<sup>[1,2]</sup>。

Imageware 是专用逆向工程处理的先驱软件,是第一个完整的同时支持逆向工程和 A 曲面解决方案的两用软件<sup>[3]</sup>;而在专用逆向软件出现之前,CAD 模型的重构都是依赖于正向的 CAD/CAE/CAM 软件来实现的,Pro/E 便是其中的一个代表。Pro/Scan-tools 是一个完全集成于 Pro/E 中的专门逆向工程处理的模块,并随着 PTC 公司的技术改进,Pro/Scan-tools 的功能有了很大提高,使得它在工业产品逆向设计上的应用也越来越广泛。文献[1,3]对当前市面上商用化的逆向软件进行了比较,但侧重在软件的基本操作上,文献[4]从数据点处理、曲线和曲面的拟合、编辑及质量评价、加工及工程分析等方面,比较和评价了商品化 CAD/CAM 软件的逆向工程功能,文献[5]基于逆向工程中的曲面建模技术,对商用逆向软件(模块)进行了分析,但都局限在逆向功能的比较上,很少就逆向建模应用过程中的特点进行深入的评述。在当前,逆向工程技术的应用仍是一项专业性很强的工作,如何根据实际的情况(如模型重构人员的水平、企业产品的特点等)选择适合企业自身需要的逆向建模系统,仍具有比较实际的意义,为此,有必要对通用的逆向建模系统进行深入的分析,为逆向软件的选型及逆向工程处理的模式提供依据。

下面结合实际的应用经验,从点云处理、特征提取与曲面建模、反求曲面质量评价及对下游工程的影响 4 个方面,以两类逆向 CAD 建模系统的典型代表 Imageware 和 Pro/scan-tools 为研究对象,对两者的特点及在逆向工程上的应用进行较为深入地比较。

## 1 逆向设计的原理与特点

在反求工程中,因为测量数据具有大规模、散乱的特点,且曲面对象边界和形状有时极其复杂,因而一般不便运用常规的曲面构造方法。主要有 3 种曲面构造方案:一是以 B-Spline 或 NURBS 曲面为基础的曲面构造方案;二是以三角 Bezier 曲面为基础的曲面构造方案;三是以多面体方式来描述曲面物体<sup>[5]</sup>。与 CopyCAD, Geomagic, Rapidform, ICEMSurf 和 RE-SOFT 等逆向建模系统不同,在曲面建模的机理上,Imagewar 与 Pro/Scan-tools 两者采用了相同的曲面描述方法,均是基于先进的 NURBS 曲面模型来实现曲面构造的。此外,在逆向建模环境上,Imageware 提供的是一个非参数化的建模环境,而有别于正向的 Pro/E 参数化建模环境,Pro/Scan-tools 也是一个非参数化环境工具,它使用了“型(Style)特征”的概念,且型特征的内部对象(如单独的曲面、曲线等)在型特征的外部或它们相互之间没有父子从属关系<sup>[1,6]</sup>。

在逆向建模的策略上,两者基本上是遵循相同的逆向建模思路,即点处理 曲线处理 曲面处理这样一个典型的逆向流程,如图 1、图 2<sup>[7]</sup>所示。但 Imageware 在这个基础上还提供了由点云直接构建曲面的处理方式,这也是 Imageware 逆向工程处理上的一个显著特点。

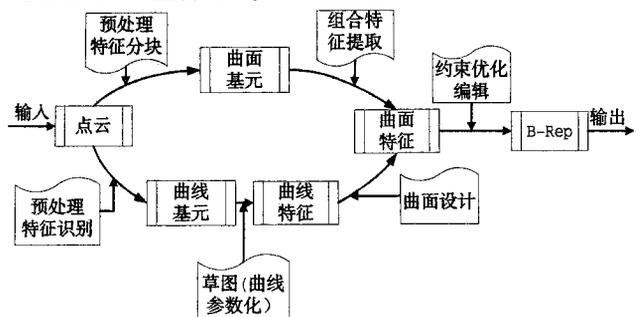


图 1 Imageware 逆向建模策略

\* 收稿日期:2006-04-11;修订日期:2006-07-14

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20050562003);广东省自然科学基金资助项目(04105386;5300090)

作者简介:余国鑫(1975-),男,江西丰城人,硕士研究生,主要从事反求工程方向的研究。

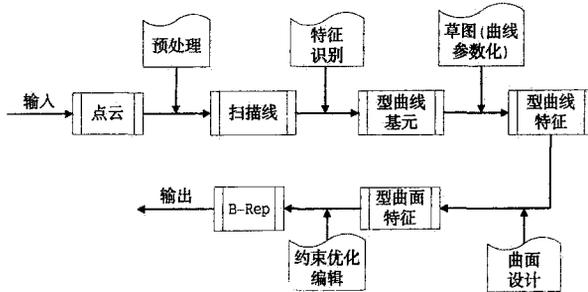


图 2 Pro/Scar-tools 逆向建模策略

Imageware 提供了在工业造型、A 曲面、模具、制造工具和数模校核方面的完整解决方案。在整个逆向工程中,无论在点的处理、线的处理及曲面的处理过程中,Imageware 都提供了多种工具及方法,使用户有极大的空间,可尽可能发挥自己的想象力,快速达到设计目标<sup>[8]</sup>。相比之下,Pro/Scar-tools 最初只是满足汽车工业的要求开发的,它只能处理扫描数据的输入,通过点过滤和线过滤技术将模型的数据减少,最终通过线来建立曲面<sup>[5]</sup>,但它一方面通过引入型特征设计方式,将设计活动孤立单一特征中,使得用户可以自由操作曲面,无需考虑型特征对象之间及模型其余部分之间的参照和父子关系;另一方面,通过维持曲面和 Pro/E 所有其它模块的关联性,使得曲面建模的过程以特征的形式表现在模型树记录上,容易实现特征的修改和再定义,为产品的创新设计带来了方便,在电器产品、汽车内饰件等工业产品的创新设计上,提供了圆满的解决方案<sup>[1,9]</sup>。

## 2 逆向建模的功能比较

### 2.1 点云处理

Imageware 提供了 Point process 模组,能够接收绝大部分的 CMM, Laser Scan, X-ray Scan 的资料和其它多种数据格式,如 asc, stl, vda, dxf, igs, ibl, pts 等,并且没有点数与资料量大小的限制<sup>[6]</sup>;Pro/Scar-tools 环境下可接受的数据格式较少,通常只能接受 igs, ibl, vda, pts 文件<sup>[9]</sup>。

Imageware 具有独特的点云处理功能,它提供了点资料的排序 (Sorting)、整理 (Cleaning)、显示 (Display)、取样 (Spacing)、剖面 (Section)、增减 (Insert\ Remove) 和合并 (Merge) 等功能,使其能顺利地往下应用在逆向工程与曲面建构的流程上。数据处理不是 Pro/Scar-tools 的强项,根据扫描点的稀疏程度和点文件格式的不同,Pro/Scar-tools 将扫描数据点分成高密度数据和低密度数据。一方面,在输入高密度点云数据时,Pro/Scar-tools 提供了扫描曲线 (Scan Curves)、自动定向曲线 (Auto Direction Curves)、剖面 (Sections) 等不同的原始数据过滤技术来消除不需要的数据点,并通过可见百分比 (Visible Points Percents) 的设置,用户可以对所要显示点云数据的大小进行调整;另一方面,在扫描曲线编辑环境下,Pro/Scar-tools 也提供了数据点删除 (Remove)、显示 (Show) 和隐藏 (Blank) 等用于扫描点编辑的功能<sup>[6,9]</sup>。

### 2.2 特征提取与曲面建模

如前文对两者逆向设计原理与特点的分析中所述,在典型的逆向建模策略上,两者各有所长。在曲线的处理上,两者都提供了多种曲线构建与编辑方法。在 Imageware 中,可以通过

拟合自由形状曲线 (Fit Free Form Curve) 创建一个均匀参数化 B-Spline 曲线,可以在指定的公差内创建拟合公差曲线 (Fit to Tolerance Curve),能基于曲线拟合曲线 (Basic Curve Fitting)、基于曲线创建曲线 (Creating Curves with Curves) 和基于曲面创建曲线 (Creating Curves with Surface),能实现曲线的合并、延伸、修整和重新参数化等多种编辑。此外,Imageware 还提供了基于点云曲率变化的颜色图来提取特征曲线的功能,用户可以在彩图激活的状态下,基于颜色 (Color based) 可从点云中直接提取出尖角特征 (Sharp Edges) 和光滑特征 (Smooth Edges),这一点为 Pro/Scar-tools 所没有。在 Pro/Scar-tools 的逆向环境下,型曲线的构建是从扫描线开始的,而扫描线的生成在这个环境下是完全自动的,这也是 Pro/Scar-tools 的最大特点之一。生成的扫描线可以进行重组 (Regroup) 编辑,通过创建、分离 (Separate)、合并,用户可以创建出初始的型曲线基元。另一个特点是,在型曲线基元生成后,用户可以在 Pro/Scar-tools 的工作界面下直接应用 Pro/E 的曲线设计与编辑功能,将 Pro/Scar-tools 的无参数化环境和 Pro/E 的参数化设计环境有机的结合起来,扩展了 Pro/Scar-tools 的逆向设计能力,这一点在下面所要论述的曲面建构方面,也是一个非常突出的特点。型曲线的编辑可以按控制点、型值点和拟合点 3 种方式从不同的方向、不同的区域等方面灵活的得以实现<sup>[9]</sup>。

在曲面建构方面,Pro/Scar-tools 除了可以基于曲线 (Surface From Curve)、基于曲面 (Surface From Surface) (且这里的源曲面并不限制于为型曲面) 创建无任何父子关系的型曲面,还可以直接应用参数化环境下的二次曲面设计与编辑、自由曲面设计与编辑等功能创建参数化曲面。在 Pro/Scar-tools 中,提供了按控制多面体、栅格扭曲曲面、拟合至参考点云 3 种方式来实现对型曲面的实时编辑,界面简单,操作方便,具有良好的人机互动性。构建自由模型时,Imageware 提供了 7 种不同的曲面生成方式:放样 (Loft)、扫掠 (Sweep)、边界混合 (Blend with Boundaries)、均匀曲面 (Uniform Surface)、UV 方向混合 (Blend UV Curve Network)、用曲线和点云拟合 (Surface Fit w/ Curve and Cloud) 及由点云直接拟合 (Surface from Cloud),其中后面 3 种方式为 Pro/Scar-tools 所不具备<sup>[1]</sup>。Imageware 是一个基于 NURBS 曲面模型的无参数化逆向设计系统,在对曲面的编辑上具有弹性高的特点,可实现对曲面的微调<sup>[6]</sup>。

应当指出的是,虽然两者在特征提取与建构上都提供了多种多样的方法和手段,但在实际的逆向建模环境下,往往都要通过对某些重要特征的边界线和脊线进行多次的拟合,以寻求重构曲面的精确度与光滑性的合理平衡,这个原则对两个逆向系统都是适用的<sup>[1]</sup>。

### 2.3 反求曲面质量评价

在典型的逆向建模中,反求曲面质量的优劣是依赖所构建边界线和脊线质量的好坏的。总的说来,在评价反求曲面质量上,Imageware 和 Pro/Scar-tools 具有如下的共同特点<sup>[6]</sup>:

(1) 透过视觉与数学上的检测工具,实现对产品品质的全面性评测;

(2) 提供了高效率的连续性管理工具,得以维持物件间的关系以及提供检测造型光滑与曲面流线的方法;

(3) 能进行及时且同步的检测,提供立即且强调美学的几何品质分析结果。

在曲线的编辑过程中,两者都提供了实时检测曲线构建品

质的功能,并能以彩图和报表的形式呈现出来,使得用户在操作中,可以根据客户的需要并结合自己的经验,对所构建的曲线的品质有一个感性的认知,且可立即反馈于设计上。此外,在曲线的创建和编辑过程中,还可以检查曲线和点云的差异及曲线的连续性。但有一点与 Imageware 不同的是,Pro/Scan-tools 中的曲线、曲面偏差测量都是相对于扫描点而言的,并不是扫描线或是型曲线,所以,它不能像 Imageware 中那样,实现对曲线与曲面之间偏差的实时检测<sup>[3]</sup>。

#### 2.4 对下游工程的影响

在机械工程领域,一个完整地逆向 CAD 模型重构完成后,其下游的工程大致有:制造加工、实体建模、快速成型和有限元分析等。由于应用的对象不同,对模型重建的精度要求也必然不尽相同。在制造加工和实体建模方面,Pro/Scan-tools 逆向模块可以无缝地和 Pro/E 系统中的 Pro/NC 模块和实体设计模块对接,在快速成型和有限元分析的应用上,亦能圆满地满足要求;而 Imageware 毕竟是一个非实体的建模环境,它逆向重构的曲面模型只有通过数据格式的转换,才能为其他的通用 CAD/CAE/CAM 系统调用来进行后续的处理,只是在快速成型方面,通过多边形化处理,可以把点云转换成三角网格,从而快速地提供 STL 数据用以快速成型。随着软件功能的进一步改善,最新版的 UG 已经实现了直接读取 Imageware 的文件,并通过数据桥(Data Bridge)模块,Pro/E 和 CATIA 也已能够直接对 Imageware 文件进行读取,这也必定进一步为 Imageware 的应用提供更大的空间<sup>[3]</sup>。

### 3 实例

如图 3 所示为一鼠标测量点数据示意图;图 4 是将测量数据以高密度数据格式导入 Pro/Scan-tools 中生成的扫描曲线示意图,这一步在 Pro/Scan-tools 中完全是自动的。图 5 则给出了最终在 Pro/Scan-tools 界面下完成的鼠标模型。

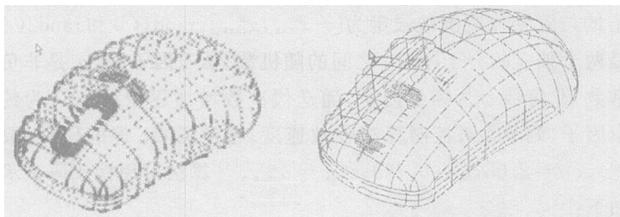


图 3 鼠标测量点数据 图 4 鼠标模型的扫描曲线显示

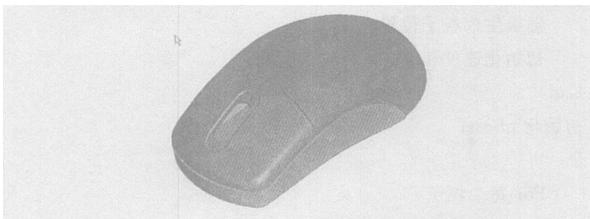


图 5 鼠标模型

图 6 所示为一液压泵壳的点云数据,共有 57 674 个测量数据点,虽然从理论上讲,使用 Pro/Scan-tools 也可以进行处理,但处理过程中将占用很大的内存而使得计算机的处理速度过慢,而在 Imageware 中,能更快捷的对点云数据进行处理,利用有关的建模方法,可以构建出如图 7 所示的最终曲面模型。

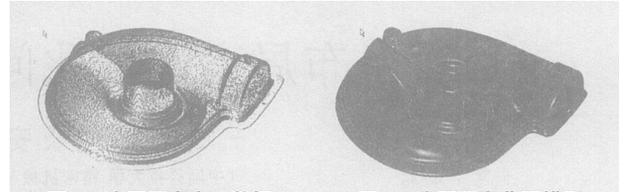


图 6 液压泵壳点云数据 图 7 液压泵壳曲面模型

以下给出的是利用 Imageware 与 Pro/Engineer 结合进行逆向建模的例子。图 8 是一个自行车座的点云数据图,共有 18 059 个测量数据点;图 9 是在 Imageware 中利用有关点云处理功能提取出的截面特征曲线示意图,图中截面特征曲线的中间部分为车座的点云数据。利用图 9 中提取出的截面特征曲线作为边界,并在相邻曲面片间的公共连接边处设置相切约束,在 Pro/Engineer 中便可以构建出车座的曲面模型,如图 10 所示。利用 Imageware 与 Pro/Engineer 相结合进行逆向建模,既能充分利用 Imageware 处理大型点云数据的优势,也能充分利用 Pro/Engineer 的参数化设计优势,从而提高了逆向建模的效率。

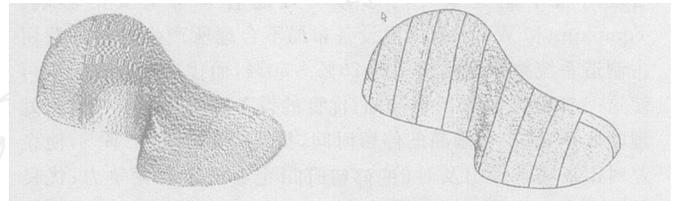


图 8 自行车车座点云数据 图 9 自行车车座截面特征曲线

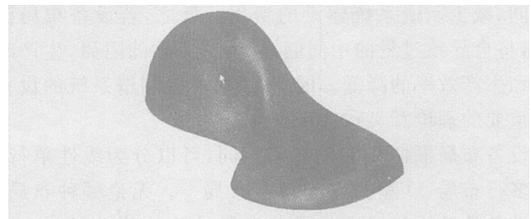


图 10 自行车车座曲面模型

### 4 结论

根据软件的使用经验,围绕着逆向工程 CAD 模型重构中的几个关键环节,对 Imageware 和 Pro/Scan-tools 的逆向 CAD 建模系统和建模的特点,作出了较为详尽的比较。综述起来可以概括为以下几点:

(1) 在曲面建模的机理上,两者都是基于 NURBS 曲面模型描述的无参数化逆向工程处理模块,Imageware 是 UG 的专门逆向模块,而 Pro/Scan-tools 则是正向的 CAD/CAE/CAM 系统 Pro/E 中最早为逆向应用开发出来的完全集成化的模块。

(2) 两者提供了不尽相同的逆向建模策略。Imageware 基于自身强大的点云处理能力,开发了由点云直接构建均匀曲面和插值曲面的功能。Pro/Scan-tools 则凭借无参数化的型曲线、型曲面特征,在逆向工程上也广泛的应用,只是由于输入点云格式的限制,两者的实际应用领域有所不同。

(3) Imageware 具有强大的点云处理能力,用户易于实现特征的提取,由点云到曲线再到曲面,Imageware 提供了种类繁多的构造和编辑方法,为高精度、高光顺的曲面模型的构造提供了切实的保证。Pro/Scan-tools 在 Pro/E 系统原有的优秀参数

(下转第 10 页)

水利水电出版社,1984.

### Optimization design of structural layout based on techniques of artificial neural network

WANG Wei<sup>1</sup>, ZHAO Mei-ying<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2</sup>, WAN Xiaopeng<sup>1</sup>

(School of Aeronautics Engineering, Northwest Polytechnics University, Xi'an 710072, China; 2. School of automation, Northwest Polytechnics University, 710072, China)

**Abstract:** The parameterized model of aircraft wing was achieved under Patran environment by the use of PCL (Patran Command Language). The optimization model contains two kinds of designing variables: geometric position variable and geometric dimension variable. On the bases of adopting Nastran software to realize optimization of geometric dimension and combining with the designing method of even experiment and utilizing the high degreed nonlinear mapping function of neural network this paper established the mapping relationship between objective function and positional designing variables. The

optimization program was compiled by using the modified feasible directional method under Matlab environment, and completed the optimization on the position of wing beam, and finally achieved the layout optimization design of the entire aircraft wing. It can be seen through this paper that let the parameterized modeling be combined with the function of neural network to carry out structural optimization could give the reins to the mapping function of neural network nicely and let the result of optimization be more precise and effective. The method provided in this paper could be able to solve the optimization problem of complicated structural positional variables under the Patran environment, thus counteracted the deficiency point of this software and let it possesses pretty good applicable popularization value.

**Key words:** artificial neural network; structural layout optimization; parameterized modeling

Fig 4 Tab 1 Ref 11

"Jixie Sheji"6087

(上接第 3 页)

化设计基础上,根据自身的特点,提供了灵活的无任何父子关系的自由建模空间,在这个空间中,用户完全可以自由操作曲面;此外,基于 Pro/E 的模型树技术,Pro/Scan-tools 具有更为灵活的逆向特征再定义功能,Imageware 在这一点上还稍显不足。

(4)在逆向处理的原则上,为了使重构模型既忠实于逆向原型又具有良好的视觉效果,两者都遵循重构曲面的精确度和光顺性的合理平衡。

(5)在对下游工程的影响方面,Pro/Scan-tools 依托于强大的 Pro/E 系统,对下游工程的影响相对很小,而尽管 Imageware 是一个非实体建模系统,通过接口的改进,它的文件也逐渐为许多通用的 CAD/CAE/CAM 软件直接调用。

比较说来,无论是专用的逆向软件,还是提供逆向模块的正向 CAD/CAE/CAM 软件,在整个逆向工程的 CAD 模型建构上,都不具备优秀而又理想通用的处理能力,在当前的逆向 CAD 建模中,结合实际中不同需求的逆向特点,在正向 CAD 软件的基础上配备专用的逆向造型软件是业界流行的处理方法<sup>[1]</sup>。

最后要说明的是,Pro/Scan-tools 只是 Pro/E 系统中能用于逆向设计的模块之一,诸如 ICESurf 和 CDRS 也是 Pro/E 的优秀曲面和逆向设计模块,它们各有特点,共同搭起了 Pro/E 在逆向设计应用上的优秀平台。

### 参考文献

- [1] 王霄. 逆向工程技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 柯映林. 反求工程 CAD 建模理论、方法和系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] 金涛,单岩,童水光. 商品化 CAD/CAM 软件反向工程功能评述[J]. 机械设计,2000,17(5):18-22.

- [5] 李江雄. 反求工程中的曲面建模技术及相关软件(模块)分析[J]. 计算机辅助设计与制造,1999(10):14-16.
- [6] 陈文贤. Imageware V11 逆向工程应用技术与范例[M]. 台北:马路科技有限公司,2004.
- [7] 杭州一茗软件有限公司,浙江大学. 反求工程软件 RE-SOFT V7.0操作手册[M]. 浙江:杭州一茗软件有限公司.
- [8] 于喆,赵敏. Imageware 优秀的逆向工程软件[J]. 计算机辅助设计与制造,2000(9):13-15.
- [9] 曹德权,唐定勇. Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 (中文版) 曲面与逆向工程设计[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

### A comparison on the CAD modeling system in typical reverse engineering

YU Gour-xin, CHENG Si-yuan, ZHANG Xiang-wei, LAI Cha-xiu

**Abstract:** Point cloud processing, picking-up of features, reverse evaluation of curved surface quality and influence analysis on followed-up engineering are several key links in the reverse reconstruction of CAD model. Currently the typical commercial reverse CAD modeling system can be divided as two kinds of the special purposed reverse software and the positive software that provides modules for reverse processing; these two softwares have their own features in the reconstruction of models. Taking the typical representatives Image-ware and Pro/Scan-tools of these two kinds of software as the target and aiming at the key links of reverse reconstruction of CAD model, this paper carried out rather detailed comparison and commentary on the features of these two softwares and carried out summary on these bases.

**Key words:** reverse engineering; CAD modeling; Imageware; Pro/Scan-tools; point clouds processing; picking-up of features

Fig 10 Tab 0 Ref 9

"Jixie Sheji"6187