

# 三维建模技术研究进展<sup>\*</sup>

栾悉道 应龙 谢毓湘 吴玲达 文军

(国防科技大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

**摘要** 三维建模是许多研究与应用领域的关键技术。对三维建模技术中涉及的三维数据获取与建模方法进行了系统的介绍,重点对激光扫描系统、基于图像建模技术进行了说明与对比。阐述了三维建模技术的最新研究进展及应用。最后指出模型检索研究以及数字化手段存在的问题,对三维建模的研究进行了展望。

**关键词** 三维建模,基于图像建模与绘制,激光扫描,三维数据获取

## Advances in Study of 3D Modeling

LUAN Xi-Dao YING Long XIE Yu-Xiang WU Ling-Da WEN Jun

(School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** 3D modeling is a key technique to much research and applications. This paper systemically introduces equipments of 3D data acquisition and modeling methods, discusses the characters and developments of laser scanning system and Image-Based Modeling and Rendering (IBMR) in recent years. This paper also introduces applications of 3D modeling. Finally, several problems and deficiencies are pointed out and further challenges are foreseen from three aspects: modeling retrieval, digitizing method, and dynamic modeling.

**Keywords** 3D modeling, IBMR, Laser-scanning, 3D data acquisition

## 1 引言

通过建立正确的模型来描述和表现事物的各种属性,是现代科学探索事物本身发展、运行规律的一个普遍而且重要的方法。不论是在应用领域还是在科学领域,对整个世界进行三维建模研究,都是一个不断兴起的领域。对现实世界的建模和模拟,就是根据研究的目标和重点,在数字空间中对其形状、材质、运动等属性进行数字化再现的过程。

随着先进的数字化仪器及设备不断投入实际应用,计算机辅助下的三维建模技术已经从最初费时费力的基于几何的手动建模,发展到包括三维扫描仪、基于图像的建模与绘制(IBM)等多种方法在内的三维建模。建模对象也从简单的几何体建模,发展到比较复杂的人脸、肢体、发丝等建模,甚至是流体的模拟。

随着三维建模在各个领域研究与应用的不断扩大和深入,有必要对现有的建模方法进行细致的比较和探讨。本文着重介绍三维信息获取、三维建模、模型表现的整个处理过程,说明各个过程的发展现状与研究重点,介绍三维建模在各个领域的应用,并阐述其未来的发展趋势。

## 2 三维信息获取

在模型数据获取阶段,要获得待建模型物体的外观数据,如长宽尺寸、深度数据。在不同的研究与应用领域,根据需求的不同,获取数据的类型与方法也有较大的不同,因而使用的设备和数据建模的过程也有区别。例如,对海底地形的三维建模,就无法通过常用的手段来获得地形数据,必须借助声纳、海洋地形、卫星等方法来得到。U. Castellani 等人研究使用声学照相系统获得水下地形的三维数据(在信号频率为

500kHz 时,精度大概为 5cm)来实时生成水下地形和环境模型<sup>[1]</sup>。

对被测物体进行外观尺寸的测量,从总体上可分为接触和非接触式两种。接触式测量方法既包括最传统的使用卷尺的测量方式,也包括复杂的坐标测量机(CMM, Coordinate Measuring Machine,精度可以达到 20 微米)。这两种方法也是机械工程行业常用的工业测量方法。传统的接触式测量不但慢,而且还给测量带来误差。CMM 系统虽然精确度高,但它是一个非移动系统,安装在一个固定平台上,对被测物体的尺寸有限制。

随着计算机图形学与视觉、声学、光学技术及其相关设备的发展,非接触式测量技术得以出现,从而大大丰富了模型获取手段的结果。非接触测量方法中包括激光扫描系统(如 VIVID910 激光扫描仪)、全站仪系统(如 AXYZ 系统,精度为 1:100000,即可以分辨一个尺寸为 5 米的物体上 50 微米的距离)、近景摄影测量系统(如 V-STARS 系统,精度高于 1:100000),以及结构光系统(如 ShapeCam 系统<sup>[2]</sup>)等。

### 2.1 激光扫描系统

以 VIVID910 激光扫描仪为例,激光扫描系统具有一些明显的优点,快速(根据不同的扫描模式,扫描时间从 0.3 秒到 2.5 秒)、数据量大(在不同的模式,至多可以得到 77000 到 300000 个点的数据)、精度高(扫描精度分别为 0.22 毫米和 0.16 毫米)而且操作简单。可以根据物体大小的不同和测量距离的需要,在三种镜头间进行切换。

文[3]在使用全向激光测距记录深度数据的同时,使用全向拍摄系统对室外场景进行拍照。利用室外场景中的各种平面区域,如墙壁、道路,使用 ICP 算法来同步匹配距离数据。然后,利用同地拍摄的照片,以相应的分辨率,对场景模型进

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(60473117)。栾悉道 博士生,研究方向为多媒体信息系统与虚拟现实技术。

行纹理映射。该系统使用的激光测距仪的测量距离为1米~200米,测量精度为±12毫米。

Yusuf Arayici 使用激光扫描仪获取建筑物的内外三维数据<sup>[4]</sup>,以生成精确的三维CAD模型。在INTELCities项目当中,将得到的三维模型与三维打印成型(3D Printing)系统和虚拟现实投影等系统结合起来,达到城市规划、文化遗产的记录和保护等目标。建筑物的三维模型存储在数据库中,还可以进一步生成城市、地区模型。

此类系统计算发射激光照射物体表面与接收折射回来的激光的时间差,这种方法虽然能够自动、高速、精确地得到物体表面的深度信息,但是设备造价昂贵,且对环境有要求(有些系统在阳光下或者雨中无法正常工作)。此外,这类系统得到的是三维点云,这些三维数据集在解析表现建筑物等复杂物体模型时,需要许多的手工处理,因而对大型复杂的物体和场景建模不适用。

## 2.2 近景摄影测量系统

基于图像的建模方法相对廉价,而且从三维信息获取的速度、可靠性以及灵活性上来说,能够满足绝大多数的实际需求<sup>[5]</sup>。以V-STARS系统为例,其精度高于1:100000。在医学领域,器官与组织建模所使用的测量数据大都来自电子计算机断层扫描CT和磁共振成像MRI。近年来出现的micro-CT技术已成功用于组织的微观结构与功能的检测、设计与制作,以及对肺部组织进行建模,分辨率在10到50微米<sup>[6]</sup>。Dhenain等人使用micro-MRI以20到80微米的分辨率对老鼠的胚胎进行扫描,可以将胚胎中各种正在发育的主要器官区分出来<sup>[7]</sup>。

这种方法的另一特点是能够通过图像信息绘制复杂物体的表面得到模型的贴图。不过,该方法的效果在很大程度上依赖于三维建模算法的设计(如基于阴影的算法,基于立体视觉的算法,基于光线跟踪的算法等),而且算法大都比较复杂,需要较多的计算资源。另外,这种方法很难对表面内凹的物体进行精确建模,这是多数基于透视成像原理的算法都不能正确处理的问题。

近几年,许多研究机构在进行三维信息获取时,系统中都使用了包括转台、数码相机在内的普通设备,以期在实验室灵活、快速、精确、廉价地得到体积相对不大的物体的三维模型<sup>[8-10]</sup>。在这些系统中,数码相机或者摄像机都是固定的。通过旋转转台,得到待建模型对象的图像序列或视频。为了把得到的图像序列自动匹配到统一的坐标系统中,相对于相机坐标系,引入了转台坐标系<sup>[8]</sup>。文[9]使用了基于视觉的几何校准算法,来得到转台轴心与相机中心的距离。文[8]和加利福尼亚大学的Miguel Sainz等人<sup>[10]</sup>都使用了在转台上绘制或者放置某种图案模式(如棋盘格)来辅助进行图像匹配。这些方法虽然结构相对简单,算法复杂度低,但其系统设计限制了它们的使用,无法对大场景或无法移动的对象进行建模。

在模型重构前,需要对相机进行定标,得到相机的拍摄和取景参数。对于使用固定相机的系统来说,虽然定标相对容易,但对对象重要几何特征的获得会受到影响,因而在建模时,模型的结构和纹理的重建可能存在重要缺陷。相对于固定数据获取设备,使用移动或者手持式相机来获取全面的三维数据较为方便,但相机校准和图像匹配较为困难。为了方便得到移动相机的内外参数,文[11]通过人工交互,指定多幅图像间的若干对应特征点。在系统场景中引入一些事先选择好的

用于校准的图案。但是,场景中的主要物体可能会部分地遮挡该图案。于是文[12]采用了一种基于模型识别的校准方法。这种方法利用光度和分割信息的自适应空间雕刻算法,来对输入的图像集进行场景的重构。

## 3 三维建模与绘制

基于几何的建模与绘制(GBMR)属于传统的三维建模方法。随着AutoCAD、Maya等三维建模软件的出现,可以通过人机交互的手段来辅助三维建模。但这些方法费时费力,而且对使用者的技巧要求很高,对于结构复杂、不规则的场景建模更是无能为力。

### 3.1 基于图像建模与绘制

基于图像建模与绘制(IBM)是计算机图形视觉与计算机图形学相交叉的一个相对新兴的领域。一般来说,IBM系统的结构相对简单,也不使用专用设备,因而廉价;适用于不同大小的物体建模;在得到物体表面深度信息的同时,得到物体表面的纹理,进而可以对三维模型进行纹理映射和贴图。目前,IBM是三维建模领域研究的热点。

基于图像的三维建模方法可以根据处理信息的类型对其进行分类<sup>[13]</sup>。第一种是基于侧影轮廓的建模方法。这种方法得到的是对象三维模型的一个初始估计,即可见外壳法(Visual Hull)。该方法速度快并具有很好的鲁棒性。由于它使用的是对象的侧影轮廓,因此,只能对形状简单的对象建模。这种方法已经得到了商业化应用。另外一类方法,则是利用阴影信息来得到模型。该方法基于Lambertian面的漫反射性质,主要针对2.5D面,且非常依赖于光照条件。第三种方法使用场景的颜色信息。根据所要构造的场景类型的不同,颜色信息具有多种运用方式。第一种就是根据颜色的一致性来进行体雕刻。但是这种方法输出的是由一些体素组成的模型,很难用于模型的三维网格表现。还可以利用颜色的一致性进行可变形模型的生成,该算法存在对光照条件的变化异常敏感的问题。另外一种使用颜色的方法,是比较纹理的局部变化,如交叉关联(cross-correlation)方法<sup>[14]</sup>。在基于颜色的这些方法中,有些在使用颜色的同时,还利用了其它信息。如文[13]在建模时,融合使用了纹理和轮廓信息。这些方法虽然也能取得比较好的结果,但模型的质量不高,主要是多种数据融合的方式存在问题。

### 3.2 IBM的工作流程与研究进展

IBM的建模流程如图1所示。在得到数字图像序列后,首先要对相机进行标定。对于使用固定相机的系统来说,相机的标定相对容易。对于移动拍摄的系统,在进行相机标定时,需要对图像进行特征提取与匹配的工作。一般说来,至少要在两幅图中找到或指定7对对应点,根据这些对应点存在的极线几何约束关系,求出基础矩阵,进而确定相机的投影矩阵。

接下来的建模过程,有几种不同的类型。这些方法包括:投影重构、可见外壳、空间雕刻法。文[15]引入一种代数对偶空间方法,不必进行图像的匹配或者指定对应特征点,利用图像对象的轮廓曲率信息估计出深度信息,进而生成可见外壳。该方法要求在曲率变化较大的地方进行较密集的采样。

在处理和表现模型时,传统的方法是使用三角形或者多边形网格来构成模型的表面。而在许多三维信息获取系统中,得到的三维数据都是点数据。使用点而不是多边形来表现对象,其优点在于无需任何拓扑信息的支持,可以简化各阶

段的处理与显示。对于不要求具有连续的对象表面、或者近距离观察模型的应用,其优势就更为明显。

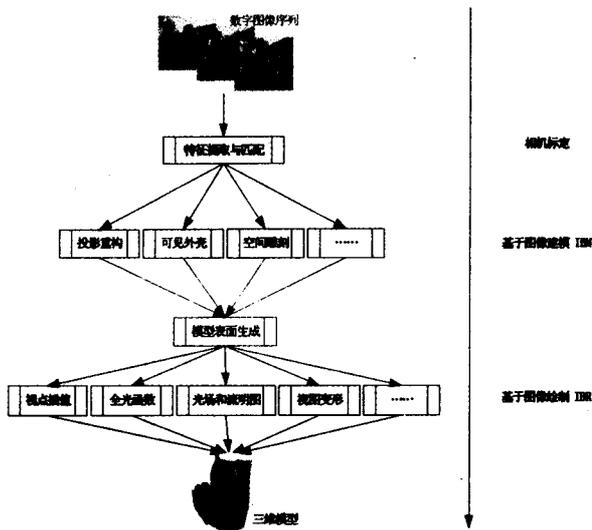


图 1 基于图像建模与绘制 IBMR 的工作流程

得到对象模型之后,IBMR 方法可以方便地将纹理映射到对象表面,生成具有真实感纹理的三维模型<sup>[10,11,16]</sup>。在基于图像绘制(IBR)的过程中,需要计算的资源较少。绘制时间与场景的复杂度无关,可以实时生成逼真的场景和动画。IBR 的主要方法包括:视点插值、全光函数、光场和流明图、视图变形、同心圆拼图等。

文[3,17]在对室外场景和建筑建模的过程中,使用了激光扫描和基于图像建模相结合的方法。这种方法既可以自动、快速、精确地获取点云三维数据,又可以发挥 IBMR 技术中纹理映射可以很好地表现模型细节的优势,避免了在建立模型时,对大量点数据的人工处理。从某种意义上来说,基于测距和基于图像建模是两种互补的技术。

#### 4 三维建模应用

三维建模以前多用于机器人导航和视觉检测,现在则越来越多地应用于视觉模拟、虚拟现实、计算机游戏、艺术与电影等领域。近年来,三维建模技术的应用领域扩展到了建筑、历史文化遗产保护、零部件的设计与制造、生物医学工程等领域。

近年来对建筑物进行三维建模研究的深入,为研究人员快速有效地记录、保存、重现宝贵的古代文化遗产及分析其在建筑技术上的不断进步提供了可能。使用激光扫描设备来对历史文化遗产进行数字化的有 Digital Michelangelo Project<sup>[18,19]</sup>、Stanford Digital Formae Urbis Romae Project 等项目<sup>[20]</sup>。文[21]开发了使用结构光的三维获取系统 Shape-Cam,对土耳其的古城 Sagalassos 进行细致的三维建模。日内瓦大学的 Pagpagiannakis 等人<sup>[22]</sup>使用 3D Studio Max 生成土耳其伊斯坦布尔 SS. 瑟古斯和巴楚斯教堂的内外两个三维模型,并用照片生成模型的材质纹理。

计算机技术运用于组织工程学,诞生了一个新领域 CATE(Computer-Aided Tissue Engineering)。CATE 主要用于生物物理的分析与模拟、组织和器官(如腰椎)的分析、人造器官(如人工骨、人工血管)的设计与制造等工作<sup>[23,24]</sup>,三维建模技术在这一领域应用得相当广泛。

将三维建模技术应用于零部件的设计与制造,可以降低

生产成本、加快开发速度,提高产品竞争力。机械部件的三维模型可以作为原型<sup>[25]</sup>,用于零部件张应力分析<sup>[26]</sup>、零部件间的过盈联接分析、产品的运动特性分析<sup>[27]</sup>,以及整个生产制造过程<sup>[28]</sup>。

#### 5 存在的问题

三维建模研究与应用的不断深入,带来了三维模型数量的快速增长,进而引发了使用上的困难。一个综合、完整的模型系统离不开高效的模型检索功能与机制。由于依靠模型所具有的形状、拓扑结构、图像颜色、表面特征等属性和特征来进行区别以及相似度的计算存在着描述上的困难,因此并不能完全满足实际的应用需求。

对现实世界中的各个物体外观及其相互之间作用规律的准确模拟,直接关系到人们在数字空间中模拟和研究现实世界的准确性和客观性。三维建模的效果与三维信息获取的方法、手段以及建模算法等过程息息相关。三维数据的获取过程,也是对现实世界中各个物体外形的一个数字化过程。这个过程中使用的设备是否有效、建模过程设计是否合理,决定了数字化的结果。以目前的数字化手段来说,不论是激光扫描、图像、视频等方法,都不能对现实世界进行完全的记录。在这个数字化的过程中,不可避免地损失了一些数据,使得这个过程无法成为一个可逆的过程。也就是说,无法从得到的图像、视频或者其他数字化的结果中完全还原世界的原貌。这种数字化的思路,有待我们进一步地探索与提高。

**总结与展望** 三维建模技术在计算机软硬件、光学等技术与设备的不断发展与促进下,已经得到快速的发展。零部件的设计与分析、生物医学工程等领域的需求,促使三维建模技术在精度上不断提高;历史文化保护、电影及艺术等领域,又对三维建模技术的真实感表现提出了更高的要求。另外,在建模时也更趋向于使用简单的设备和过程,来满足不同应用层次的需求。三维建模技术研究,应该由现在不断追求具有更高精度、看起来更加真实的静态模型,发展向未来能够模拟现实世界各个对象间相互作用的动态模型,进而更加有效地辅助人们探索事物发展规律的研究。

#### 参考文献

- Castellani U, Fusiello A, Murino V, Papaleo L, Puppo E, Pittore M. A complete system for on-line 3D modelling from acoustic images. *Signal Processing: Image Communication*, 2005, 20:832~852
- Eyetrionics, 2004. <http://www.eyetrionics.com>
- Asai T, Kanbara M, Yokoya N. 3D Modeling of Outdoor Environments by Integrating Omnidirectional Range and Color Images. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'05)*
- Arayici Y, Hamilton A. Modeling 3D Scanned Data to Visualize the Built Environment. In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation*, 2005. 509~514
- Setan H, Ibrahim M.S. Close Range Measurement and 3D Modeling. Presented at the 1<sup>st</sup> International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, 2004
- Kriete A, Breithecker A, Rau W. 3D imaging of lung tissue by confocal microscopy and micro-CT. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2001. 469~476

(下转第 229 页)

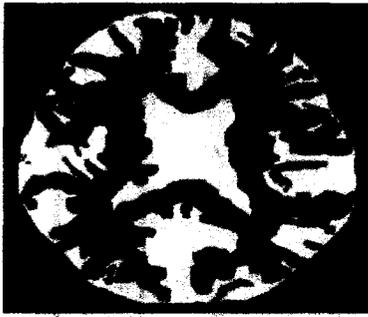


图9 脑白质(FCM方法)

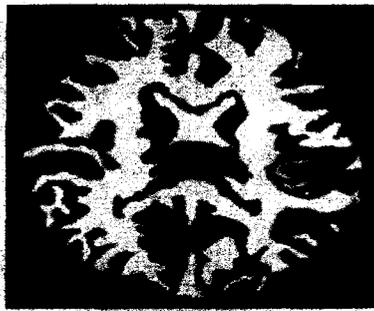


图10 脑灰质(FCM方法)



图11 脑脊液(FCM方法)

**结束语** 实验结果表明,与神经网络和FCM等方法相比较,该算法能够较准确地分割出颅磁共振图像各元素。动态自适应蚁群算法也更具有灵活性,它能灵活地调整聚类过程,可以更准确地识别结果,运行速度比较快,但缺点是一些参数要经过反复的试验才能确定。作为一种新的智能优化计算方法,蚁群算法的许多理论还需要完善,在磁共振图像分割的应用中才刚刚开始,而且也只是局限于实验室阶段。希望随着研究的不断深入,将会有更多的成果出现,并能应用到实际的问题当中。

### 参考文献

- 汪红志,聂生东. MR 脑图像组织分割的方法[J]. 国外医学生物医学工程分册, 2005, 28(5): 302~306
- Chiu Ming-Jang, Lin Chung-Chih, Chuang Kai-Hasiang, et al. Tissue Segmentation-Assisted Analysis of MRI for Human Motor Response: An Approach Combining Artificial Neural Network and Fuzzy C Means[C]. Journal of Digital Imaging, 2004, 1(5): 38~47
- 徐海祥,喻莉,朱光喜,等. 基于支持向量机的磁共振脑组织图像分割[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(10): 12754~1280
- Suri J S, Singh S, Reden L. Computer Vision and Pattern Recognition Techniques for 2-D and 3-D MR Cerebral Cortical Segmentation (Part I): A State-of-the-Art Review [C]. Pattern Analysis & Applications, 2002, 5: 46~76
- Dorigo M, Blum C. Ant colony optimization theory: A survey[C]. Theoretical Computer Science, 2005, 344: 243~278
- Weng Sung-Shun, Liu Yuan-Hung. Ming time series data for segmentation by using Ant Colony Optimization [C]. European Journal of Operational Research, 2006, 173: 921~937
- Sivagaminathan R K, Ramakrishnan S. A hybrid approach for feature subset selection using neural networks and ant colony optimization[C]. Expert Systems with Applications, 2006, 121: 134~146
- 杨瑞. 基于蚁群算法的模糊小波网络控制策略及其应用研究[D]. [西安理工大学博士论文]. 2005
- 毕晓君. 基于智能信息技术的纹理图像识别与生成研究[D]. [哈尔滨工程大学博士论文]. 2006
- 黄永锋,赵俊,庄天戈. 遗传神经网络在颅磁共振图像分割中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(5): 771~774
- Dhenain M, Ruffins SW, Jacobs RE. Three-dimensional digital mouse atlas using high resolution MRI. Developmental Biology, 2001, 232(2): 458~470
- Park S Y, Subbarao M. A multiview 3D modeling system based on stereo vision techniques. Machine Vision and Applications, 2005, 16: 148~156
- Yılmaz U, Mülâym A, Atalay V. Reconstruction of Three Dimensional Models from Real Images. In: Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT. 02), 2002
- Sainz M, Pajarola R, Mercade A. A Simple Approach for Point-Based Object Capturing and Rendering. IEEE Computer Graphics and Applications, July-August 2004. 24~33
- 刘钢,王章野,彭群. 自由拍摄视点下的可见外壳生成算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(11): 1501~1505
- Montenegro A A, Carvalho P C P, Velho L, Gattass M. Space carving with a hand-held camera. In: Proceedings of the XVII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'04), 2004. 396~403
- Esteban C H, Schmitt F. Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 96: 367~392
- Sarti A, Tubaro S. Image based multiresolution implicit object modeling. EURASIP J. Appl. Signal Process, 2002, 10: 1053~1066
- Brand M, Kang K, Cooper D B. Algebraic solution for the visual hull. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2004. 133~135
- Yang Y K, Lee J, Kim S K, Kim C H. Adaptive Space Carving with Texture Mapping. LNCS 3482, 2005. 1129~1138
- De Luca L, Veron P, Florenzano M. Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. Computers & Graphics, 2006, 30: 160~176
- Digital Michelangelo project. <http://graphics.stanford.edu/data/mich/>
- Levoy M, Pulli K, Curless B, et al. The digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues. In Siggraph 2000. 131~144
- Stanford digital Formae Urbis Romae project. <http://formaurbis.stanford.edu/index.html>
- Mueller P, Vereenoghe T, Vergauwen M, Van Gool L, Waelkens M. Photo-realistic and detailed 3D modeling: the Antonine nymphaeum at Sagalassos (Turkey). Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA): Beyond the artifact - Digital interpretation of the past. [[http://www.vision.ee.ethz.ch/~pmueller/documents/caa04\\_pmueller.pdf](http://www.vision.ee.ethz.ch/~pmueller/documents/caa04_pmueller.pdf)], accessed Mar. 2005]
- 魏迎梅, 栾悉道. 虚拟现实技术. 电子工业出版社, 2005
- Lian Qin, Li Di-Chen, Tang Yi-Ping, Zhang Yong-Rui. Computer modeling approach for a novel internal architecture of artificial bone. CAD Computer Aided Design, 2006, 38(5): 507~514
- Sun W, Starly B, Nam J, Darling A. Bio-CAD modeling and its applications in computer-aided tissue engineering. Computer-Aided Design, 2005, 37: 1097~1114
- Santos D M C, Pertence A E M, Campos H B, Cetlin P R. The development of 3D models through rapid prototyping concepts. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 1~4
- Lewis A C, Geltmacher A B. Image-based modeling of the response of experimental 3D microstructures to mechanical loading. Scripta Materialia, 2006, 55(1): 81~85
- Makkonen T, Nevala K, Heikkilä R. A 3D model based control of an excavator. Automation in Construction, 2006, 15(5): 571~577
- Qin S F, Harrison R, West A A, Wright D K. Development of a novel 3D simulation modelling system for distributed manufacturing. Computers in Industry, 2004, 54: 69~81
- 邱建雄, 赵跃龙, 杨瑞元. 基于图像的建模和绘制技术综述. 小型微型计算机系统, 2004, 25(5): 908~912

(上接第 210 页)