

# 文物三维重建关键技术

邱兆文<sup>1,2</sup>, 张田文<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 文物三维重建是数字博物馆的关键技术, 本文详细论述了文物三维重建中的 3D 建模、纹理映射等关键技术, 给出了文物三维重建的可行方案, 并对文物三维重建技术领域的未来发展进行了展望。

**关键词:** 文物三维重建; 纹理; 3D 建模; 纹理贴图

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2008) 12-2423-05

## Key Techniques on Cultural Relic 3D Reconstruction

QIU Zhaowen<sup>1,2</sup> ZHANG Tianwen<sup>1</sup>

(1. Institute of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001;

2. Institute of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract:** Cultural relic 3d reconstruction is key techniques of digital museum. The key techniques of 3d modeling and texture mapping are discussed in detail and an feasible project is given in this paper. Some key issues of cultural relic 3D reconstruction for future research are discussed.

**Key words:** cultural relic 3D reconstruction; texture; 3D modeling; texture mapping

### 1 引言

随着时间的流逝和人类活动的影响, 古文物不断遭到破坏, 如何采用新技术、新手段对文物进行数字化处理, 让人类瑰宝永存已经成为迫在眉睫的全球性问题。对珍贵文物进行数字化处理, 建成基于网络的数字化博物馆系统, 可以较好地解决丰富的展品与有限的展览空间、时间的矛盾, 进一步开拓博物馆藏品保护、研究和展示的新领域, 还可以实现博物馆管理观念和管理手段的现代化, 进而强化博物馆的服务社会、文化遗产保护和科学研究的功能。对于实现资源共享、保护珍贵的博物馆资源、传播古老的中国文化、展示悠久的历史文化遗产具有极其重要的现实意义。对文物进行数字化处理不仅实现了三维表达和虚拟展示, 更重要的是精确的文物数字模型记录了文物原始的真实三维信息和纹理信息, 为文物修缮和恢复提供了重要的数据和模型支持<sup>[1~3]</sup>。

文物数字化主要包括中小单件文物的数字化和古建筑、遗址等大型古文物的数字化。近几年, 国内外许多科研机构进行了文物数字化应用研究。如美国的斯坦福大学利用激光测距仪对米开朗基罗雕像进行了数字化<sup>[4]</sup>。加拿大开发了 NRC's 3D Imaging 系统<sup>[5]</sup>, 收集文

物、艺术画廊的原始数据。国内敦煌研究院承担的“濒危珍贵文物信息的计算机存储与再现系统”列入国家科委重大课题。浙江大学与敦煌研究院合作对敦煌洞窟壁画进行了数字化。东北林业大学与北京朝日公司合作对首都博物馆的部分珍贵文物进行了数字化工作。

由于大型古文物的场景结构复杂, 测量机位点多, 数据量大, 因此在坐标配准、3D 建模<sup>[6,7]</sup>、纹理影射上都要比单一文物的数字化复杂。本文主要论述了文物三维重建中的 3D 建模和纹理映射等关键技术, 给出了文物数字化的可行方案。

### 2 文物三维模型的获取

对珍贵文物的三维重建要求很严格, 一是珍贵文物不允许直接触摸, 二是对文物无损检测精度要求很高。通常可用下面几种方法对文物进行 3D 建模<sup>[8,9]</sup>。

#### (1) 基于 $x$ 射线扫描的方法

利用第三代工业 CT 对文物进行分层扫描, 根据扫描文物的材质调整  $x$  射线的强度, 得到每层的扫描图像, 再利用 VGStudioMAX 等软件包对所有的分层图像进行叠加就可完成对文物的三维建模复原。我们在哈尔滨东安发动机集团无损检测中心利用第三代工业 CT 对

青铜器文物做了检测分析,其检测精度可达到亚像素级。可以通过三维模拟内窥镜进入文物内部进行任意视角的观测,可以制作文物内部三维演示动画。图2是切片内壁间距离的计算例子,能精确到0.01mm,图3是10张切片叠加后的三维复原效果,10张切片叠加后的厚度是5mm。对文物的分层越精细,叠加后的三维复原效果越好。使用第三代工业CT扫描的优点是x射线可穿透文物,可以扫描出文物内部的纹理和缺陷。如果要对文物内部不可见部分建模,必须使用第三代工业CT。缺点是第三代工业CT价格较昂贵,体积较大,不能到现场扫描文物。由于要分层扫描,扫描一件文物的时间也较长。

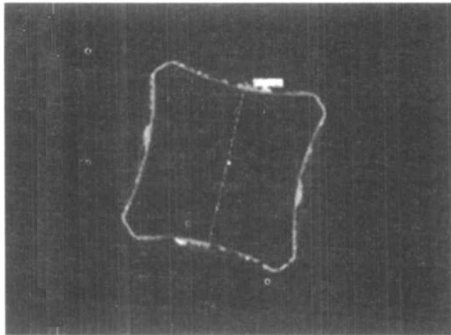


图1 单个切片内壁间距离检测图

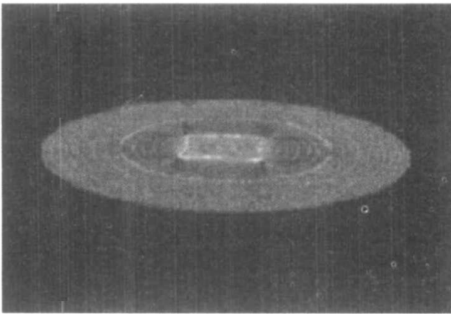


图2 10张切片叠加后的三维复原图

(2) 基于激光扫描的方法

使用三维扫描仪可实现中小件文物和古建筑的扫描,可在无接触的情况下确定文物的几何尺寸、外形,并能满足测量精度控制在允许范围内<sup>[10]</sup>。光学三维扫描仪工作原理是利用激光三角测距原理,通过光源孔发射出一束水平的激光束来扫描物体,该激光线经过旋转平面,镜的作用改变角度,使得激光线发射到物体表面。物体表面反射激光束,每一条激光线,都通过CCD传感器采集成一帧数据<sup>[11]</sup>。根据物体表面不同的形状,每条激光线反射回来的信息中所包含表面形状和颜色数据。三维扫描仪Vivid910测量精度可达0.015~0.01mm,扫描速度每次0.3秒。高速的扫描使得用户在很短时间内得到所需的数据,大大缩短了文物3D建模的时间。同第三代工业CT相比,光学三维扫描仪的优点是价格相对

低,体积相对小,方便携带。扫描一件文物的时间也相对少。若不考虑对文物的内部进行无损检测和三维重建,光学三维扫描仪是较理想的选择。

(3) 基于图像的方法

基于图像的建模方法是根据立体视觉或运动图像自动或半自动地提取场景的几何信息<sup>[12-14]</sup>。牛津大学<sup>[15]</sup>、比利时Leuven大学<sup>[16]</sup>和国内武汉大学、中科院自动化所在这方面做了很多工作。基于图像的建模方法很难从图像中提取高精度的三维数据,适合简单场景的描述,不适合文物的高精度建模。基于图像的三维重建的基本原理是通过两幅以上的图像获取图像中各点的空间信息,进而建立文物的3D模型。

给定  $M$  幅图象,  $N$  个对应点:

$$m_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N)$$

求  $M$  个投影矩阵

$$P_{1p}, P_{2p}, \dots, P_{Mp}$$

和  $N$  个空间点

$$X_1, X_2, \dots, X_N$$

使得下列关系式成立

$$m_{ij} \approx P_{ip} X_j = (P_{ip} A) (A^{-1} X_j)$$

$$(i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

当式(1)中  $A$  为射影变换矩阵时,称此时的重建为射影重建。当  $A$  为仿射变换矩阵时,称此时的重建为仿射重建。当  $A$  为刚体变换矩阵时,称此时的重建为欧氏重建。

射影重建主要有基于二幅图象的方法和基于因式分解的方法。仿射重建主要有基于模约束的方法和基于摄像机平移运动的方法。下面给出基于二幅图象的重建算法。

基于二幅图象的重建方法:

(i) 计算第一、第二幅图象之间的基础矩阵  $F$ , 第二幅图象的外极点  $e$ ;

(ii) 计算  $P_1$  和  $P_2$ ,

$$P_1 \approx (I \ 0)$$

$$P_2 \approx ([e]_x F \ e)$$

(iii) 利用  $P_1$  和  $P_2$  计算空间点  $X$  的坐标

$$\lambda_1 = P_1 X$$

$$\lambda_2 = P_2 X$$

(iv) 利用已得到的  $X$  求其它  $P_i$

$$\lambda_i = P_i X$$

(4) 基于结构光的方法

基于结构光的三维重建系统由投影仪、光栅、旋转平台、摄像机、计算机组成。基于结构光的重建利用结构光的信息,提取图像的特征,可对无明显特征的物体进行重建,避免了图像之间的匹配。

基于结构光的三维重建的过程: 摄像机标定、光栅平面标定、旋转平台标定、三维重建、三维配准、三维融合及三角化、纹理映射与三维显示。

### 3 纹理映射

简单来说, 纹理就是附着在网格模型表面的颜色信息, 当网格模型以网格表示时, 纹理就是对应于每个网格顶点的颜色的集合。为获取高分辨率、精确的三维文物模型, 工作的重点在于网格模型与图像之间的纹理映射, 即建立网格模型上各顶点与图像像素间的对应关系<sup>[7]</sup>。纹理映射通常有以下几种方法:

(1) 使用 3dMax 等专业软件进行纹理贴图。用三维扫描仪扫描文物获取 3D 模型后, 进行预处理和三维数据压缩后得到文物的 3D 模型, 再利用 3dMax 等软件以手工交互的方式, 将图像上对应点的颜色贴到经过压缩处理的模型上, 对模型进行纹理映射。这种人工贴纹理方式的缺点是: 贴图需要大量的手工交互, 使得这种方法的自动化程度低, 同时在很大程度上依赖于用户的经验和技巧, 制作成本较高。

(2) 借助专门的硬件设备。Vivid910 在采集文物三维图像的同时, 使用一个镜头同时捕捉几何和颜色信息, 这样也可以将材质映射到相应的几何体上。因此最终得到的三维网格模型实际上经具有纹理信息, 亦即网格模型的每一个顶点都已经被赋上了一个颜色值。这种方式的缺点是: 如果借助于专门的硬件设备, 除非建立相当严格的实验环境, 否则在拍摄不同视点的彩色图像时的光照条件很难完全一致, 从而得到的彩色图像的亮度也并不完全相同, 这样当不同的图像最终都映射到一个完整的网格模型表面时, 就可能在图像的接缝区域出现视觉效果上明显不一致的纹理, 从而影响效果。而且 3D 模型放大后会失真, 不能满足高精度要求。

(3) 半自动和全自动的纹理映射方法。使用透视投影模型来描述纹理映射, 自动或者半自动的建立网格模型和彩色图像之间的纹理映射。文物网格模型是实际文物经过三维扫描仪离散采样后在世界坐标系当中的表示, 根据透视投影模型, 首先将其坐标变换到拍摄彩色图像的摄像机所在的摄像机坐标系, 之后再进一步将其透视投影变换到平面的图像坐标系, 从而生成文物的二维彩色图像。这实际上是一个图像与网格模型之间的配准问题。我们对一些图像与网格模型手工标记出对应的特征, 利用透视投影模型来进行图像和网格模型的配准, 从而求解出图像与模型间的纹理映射<sup>[6]</sup>。

纹理映射的过程如下:

#### (1) 透视投影矩阵的计算

设文物网格模型上一点  $P$  的世界坐标为  $(x, y, z)$ ,

点  $P$  在一幅彩色图像上对应的点的坐标是  $(u, v)$ ,  $(x,$

$y, z)$  和  $(u, v)$  称为一组特征对应, 它们之间的关系可以用齐次坐标和矩阵形式来表示:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix}$  为透视投影矩阵。通过手工标记多组网格模型和相应图像上的对应的特征点, 求解透视投影矩阵  $M$ 。

#### (2) 求网格模型上每一个网格点的纹理值

求出透视投影矩阵  $M$  后, 遍历网格模型上所有的点, 对于每一个点, 由公式(1), 求出这一点在二维图像上对应的坐标点, 并且取出这个二维图像上坐标点的 RGB 值, 把它们赋给网格模型上的点, 作为网格点的纹理值。半自动和全自动的纹理映射研究虽然取得了一定成果, 但纹理映射后的效果不太理想, 还不能满足文物贴图的高精度要求。目前的文物三维重建仍主要采用手工纹理贴图, 半自动和全自动的纹理映射将是今后的主要研究方向。

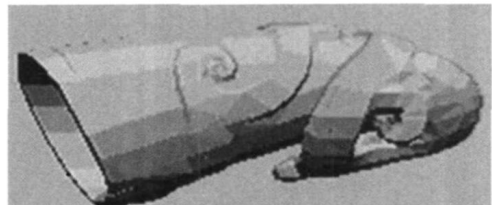
### 4 文物数字化解决方案

本文采用的文物数字化解决方案如下:

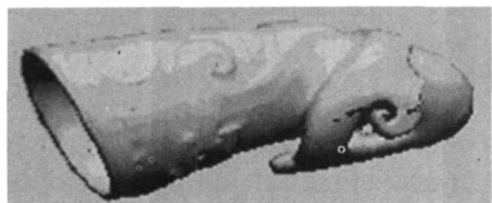
首先, 用 Vivid 910 三维激光扫描仪和高分辨率的数码相机采集文物的空间和纹理数据; 接着, 将所有的三维数据整合, 生成三维网格模型; 最后, 通过纹理映射, 建立精确的数字化模型。下面以玉杯为例给出文物的数字化过程。

#### (1) 文物三维建模

我们在首都博物馆部分珍贵文物的数字化中采用了激光扫描的方法来获取文物的 3D 模型。首先, 用



(a) 压缩后的数据 (1260 面)



(b) 压缩后的数据 (1260 面)

图 3 三维数据压缩

Vivid910 三维激光扫描仪和高分辨率的数码相机采集文物的空间和纹理数据,对文物的扫描分多次进行,为保证拼接的准确性,应使相邻扫描具有一定的重叠度.接着对三维数据进行预处理,去除噪声,填补空洞数据.空洞数据填补采用两种方法,当空洞出现在平面区域内,采用线性插值的方法填补空洞数据.当空洞出现在非平面区域内,采取 B 样条插值的方法.对于文物三维模型的获取需要设置多个视点,各视点测得的三维数据相对于视点本身是局部坐标系,只有将各视点获取的三维数据拼合在同一个坐标系,方可得到文物的完整数据描述<sup>[8]</sup>.本文采用了典型的 ICP 算法进行配准<sup>[9]</sup>,ICP 算法要求各视点的三维数据点集有重叠,配准单元是点.配准的方法还有基于特征的配准方法<sup>[20]</sup>,基于特征的配准方法要求首先从三维点云中求出计算特征,如无计算特征或计算特征不足无法配准.一般文物的几何形状较复杂,难于求出合适的三维特征.将所有的三维数据配准整合,生成三维网格模型.用三维扫描仪扫描文物获取的是高精度 3D 模型,例如玉杯的 3D 模型有 113 万个面,必须进行三维数据压缩,以便进行纹理映射和

后期处理.本文采用的三维数据压缩算法如下:首先检测四边形网格所覆盖的三维点是否在同一平面内,如果在同一个平面内,则保留四个顶点,删除其内所有的三维点,否则沿中间拆成四个小四边形,并继续判断验证,直到不能再划分为止.图 3(a) 是压缩到 1260 个面的情况,图 3(b) 是压缩到 13604 个面的情况,压缩后数据减少为原来的 1.2%.从图 3 可以看出:压缩后减少了数据量,较好地保持了边缘特征,便于纹理映射和后期处理.

## (2) 纹理贴图

为了在扫描模型的同时获取高精度的纹理图像,我们在 Vivid910 上方固定高分辨率数码相机,在完成每次扫描的同时,获取对应高分辨率的图像,拍摄时要注意消除高光的影响.用于玉杯纹理贴图的图像的分辨率是 3872\* 2592,共拍摄了 12 张图像.由于珍贵文物的纹理贴图对精度要求极高,本文采用了人工进行纹理贴图的方法.将所有拍摄的图像平展开一个贴图文件,如图 4 所示.该贴图文件用于压缩处理后的文物 3D 模型的纹理贴图,纹理贴图后的 3D 模型如图 5 所示.

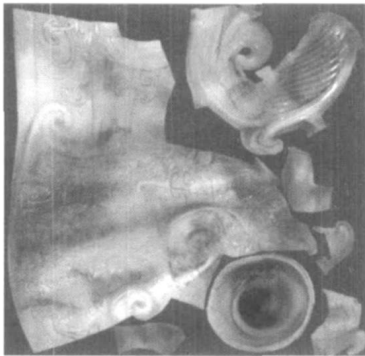


图 4 展开后的纹理贴图文件

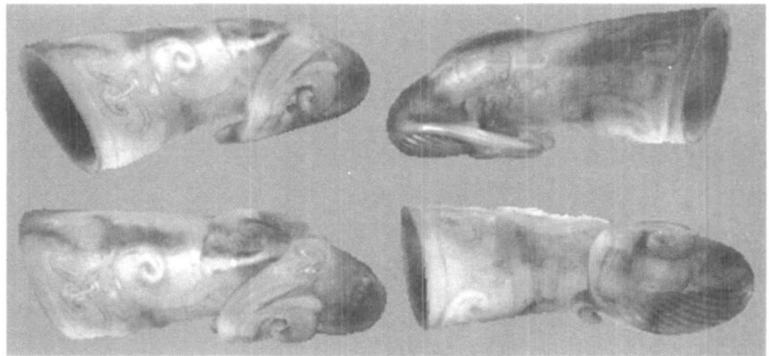


图 5 贴图后的 3D 模型

## (3) 虚拟展示

文物三维虚拟再现工艺流程如图 6 所示,建立好的文物 3D 模型,即可在 web 上发布,用于虚拟展示.用户可通过鼠标和键盘随意控制 3D 模型,还可通过快速模具成型机将文物 3D 模型加工成实物,实现文物的真实再现.

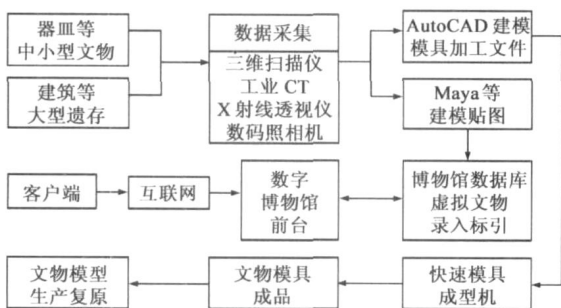


图 6 文物三维虚拟展示与再现工艺流程

使用中视典的 VRPIE 三维网络平台将文物的 3D

模型输出为 web 格式,处理后的 web 格式的 3D 模型文件只有几百 KB 大小,用户可通过 web 浏览器快速方便地浏览和控制 3D 模型.

## 5 展望

文物的三维重建与检索是近几年兴起的一个新的研究领域,目前仍然处于起步阶段.从国内来说,这方面的研究工作还很少见.经过近几年的发展,文物的三维重建与检索技术取得了不少的研究成果,但是还有许多问题需要解决,我们认为这项技术今后的研究方向主要集中在以下几个方面.

### (1) 文物的 3D 建模

改进文物 3D 建模的压缩算法,在保证精度的前提下,尽量压缩文物 3D 网格模型的顶点数和面数,这样便于后期的纹理映射,降低 3D 模型文件的大小,方便在网络上传输和虚拟展示.

### (2) 3D 模型的纹理映射

由于文物对纹理映射的要求很高,目前的纹理映射基本靠手工实现,效率很低,对人员的技术水平要求较高,无法大规模应用推广.研究有效的半自动和全自动的纹理映射算法,将提高 3D 模型纹理映射的精度和速度,实现大批量的文物三维重建.

### (3) 3D 模型的检索

随着文物数字化技术的应用推广,互联网上将出现大量的文物 3D 模型,如何帮助用户建立个人多媒体数据管理模型,设计面向用户的 3D 检索引擎,利用用户的语义模型和兴趣模型帮用户实现个性化 3D 模型检索,并为用户提供个性化推荐服务将是未来新的研究方向.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张爱武, 胡少兴, 孙卫东等. 基于激光与可见光同步数据的室外场景三维重建. 电子学报. 2005, 33( 5 ): 810- 815.
- [ 2 ] 胡伟, 潘志庚等. 虚拟世界自然文化遗产保护关键技术概述. 系统仿真学报. 2003, 15( 3 ): 315- 318.
- [ 3 ] 胡少兴, 查红彬, 张爱武. 大型古文物真三维数字化方法. 系统仿真学报. 2006, 18( 4 ): 951- 954.
- [ 4 ] The Digital Michelangelo Project [ DB/ OL ]. <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>, 2004- 08- 15.
- [ 5 ] Visual Information Technology Group [ C ]. Canada. <http://www.vit.iit.nrc.ca/VIT.html>, 2002- 02- 10.
- [ 6 ] G Turk, M Levoy. Zippered polygon meshes from range images [ A ]. SIGGRAPH 94 Proceedings [ C ]. ACM SIGGRAPH, 1994, 311- 318.
- [ 7 ] V Sequeira, K Ng, E Wolfart, J G. M Goncalves, D Hogg. Automated reconstruction of 3D models from real environments [ J ]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999, 54( 1 ): 1- 22.
- [ 8 ] B Curless, M Levoy. A volumetric method for building complex models from range images [ A ]. SIGGRAPH 96 Proceedings [ C ]. ACM SIGGRAPH. 1996, 303- 312.
- [ 9 ] I Stamos, P K Allen. Geometry and texture recovery of scenes of large scale [ J ]. Computer Vision and Image Understanding. 2002, 88( 7 ): 94- 118.
- [ 10 ] 张瑞, 骆岩林等. 文物数字化的关键技术. 北京师范大学学报. 2007, 43( 2 ): 150- 153
- [ 11 ] Huijing Zhao, Ryosuke Shibasaki. Reconstruction of textured urban 3D model by fusing ground based laser range and CCD images [ J ]. IEICE Trans Inf & Syst, 2000, E83 D( 7 ): 1429- 1440.
- [ 12 ] Debevec P E, et al. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image based approach [ J ]. Computer Graphics, 1996, 30: 11- 20.
- [ 13 ] Z Kim, et al. Automatic description of buildings with complex rooftops from multiple images [ A ]. Computer Vision and Pattern Recognition [ C ]. Kauai, 2001. 272- 279.
- [ 14 ] S B Kang, R Szeliski. 3-D scene data recovery using omnidirectional multibaseline stereo [ R ]. Cambridge Research Lab: Digital Equipment Corporation, October, 1995.
- [ 15 ] Visual Geometry Group [ DB/ OL ]. <http://www.robots.ox.ac.uk/vgg/>, 2004- 09- 02.
- [ 16 ] Marc Pollefeys. Obtaining 3D models with a hand held camera [ A ]. Lecture Notes SIGGRAPH Course [ C ]. ACM SIGGRAPH, 2001.
- [ 17 ] 张英杰, 张铁昌. 纹理映射技术的发展综述. 计算机工程与应用. 1994, 3( 4 ): 1- 4
- [ 18 ] 张爱武, 孙卫东等. 室外大型场景多机位三维数据全局快速配准. 高技术通讯. 2004, 6: 6- 10.
- [ 19 ] P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3-D shapes [ J ]. IEEE Trans. PAMI ( S0162-8828 ), 1992, 14( 2 ): 239- 256.
- [ 20 ] A. Johnson. Spir Images: A representation for 3-D surface matching. [ D ]. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Aug. 1997.

#### 作者简介:

邱兆文 男, 1974 年生, 副教授, 博士研究生, 研究方向为多媒体信息检索, 三维重建和虚拟现实.

Email: gxyzw@nefu.edu.cn

张田文 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为人工智能和计算机视觉.