

三维虚拟物体表面重建的研究

何小海 罗代升 陶青川 吴晓红 冉均国

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(四川大学材料科学与工程学院, 成都 610064)

摘要 在激光扫描共焦显微成像、CT 成像、MRI 成像, 以及在图象处理和识别中, 三维物体的显示是必不可少的。目前, 最流行的显示方式是虚拟物体的三维重建。通常虚拟物体三维重建可以采用体素级重建, 也可以采用切片级重建。由于切片级重建仍需要解决物体轮廓对应、分叉曲面、轮廓拼接等关键性问题, 为此, 提出了一些新的方法。在这些方法中, 轮廓的对应采用 OR 运算和 AND 运算来确定。如果两个轮廓的 OR 和 AND 运算结果满足预先设置的准则, 则这两个轮廓相对应; 分叉曲面采用数学形态学方法来分解, 其由形态学方法生成的边界就是分叉曲面的分割线; 轮廓拼接则是将对应轮廓经多边形简化后, 由三角形拼接法来构成表面, 且三角形是根据最小轮廓跨越边准则来构建的。通过对这些方法进行实验结果表明, 理论与实际完全相符。这些方法的优点是编程简单, 运算速度快。

关键词 三维成像 三维图象处理和识别 三维物体表面重建 虚拟现实表面显示 数学形态学

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)11-1192-06

A Study in Surface Reconstruction of 3D Virtual Objects

HE Xiao-hai¹⁾, LUO Dai-sheng¹⁾, TAO Qing-chuan¹⁾, WU Xiao-hong¹⁾, RAN Jun-guo²⁾

¹⁾(Institute of Electronics and Information, University of Sichuan, Chengdu 610064)

²⁾(Institute of Material Science and Engineering, University of Sichuan, Chengdu 610064)

Abstract In laser scanning confocal microscopy imaging, CT imaging, MRI imaging, and in 3D image processing and recognition, visualization of 3D objects is essential. Nowadays, the popular ISO surface visualization is based on 3D virtual object reconstruction. The 3D virtual object reconstruction can be volume based. It can also be 2D slice based. In the 2D slice based, due to the still existing problems, such as contour pairing, surface diverging, contour pair patching, etc, a few new methods are proposed for the problem solving. In these methods, the contour pairing is carried out with OR and AND operations. For two contours, if the results of the OR and AND operations satisfy a pre-set criterion, the two contours are a pair. The surface diverging is decomposed with mathematical morphology. The boundaries generated by the morphologic operation are that of the diverging surfaces. The contour pair is patched with triangles to form the ISO surface after the pair is polygonized. The triangles are constructed under the criterion of minimum contour linking edge. With the methods, some experiments have been done. The experimental results showed that the theories of the methods coincide perfectly with the practice. The advantages of the methods are simple programming and fast computation.

Keywords 3D imaging, 3D image processing and recognition, 3D object reconstruction, VR visualization, Morphology

0 前言

在激光扫描共焦显微成像, CT 成像, MRI 成像

以及三维图象处理和识别中, 物体的三维显示是必不可少的。三维物体的显示主要有动画(Animation)、投影(Projection)和虚拟现实(Virtual Realization)显示 3 种。目前, 虚拟现实是最流行的

显示方式. 虚拟现实显示需要用三角形, 四边形或多边形来重建三维物体的三维显示表面. 这种表面重建可以分为体素级重建和切片级重建两类. 其中, 体素级重建主要采用立方体法 (Cuberille)^[1]、移动立方体法 (Marching Cube)^[2] 和分解立方体法 (Dividing Cubes)^[3]; 切片级重建主要采用环形轮廓拼接方法^[4]. 在此基础上, 后来又研究了一些改进方法^[5~7]. 切片级重建和体素级重建相比, 其优点是在虚拟物体的三维重建中, 可以把三维问题转化成二维问题.

笔者对三维图象, 例如在激光扫描共焦显微图象的虚拟物体三维重建中, 就曾对体素级和切片级重建方法进行了研究. 由于切片级重建尚存在一些没有完全解决的问题, 诸如轮廓对应、分叉曲面、轮廓拼接等关键性问题^[7,8], 因此, 本文提出了一些新的解决方法, 即在轮廓对应中是采用 OR 运算和 AND 运算来确定轮廓的对应; 对分叉曲面, 则采用数学形态学方法把一对多或多对一的轮廓对应分解成一对一的轮廓对应; 在轮廓拼接中, 则采用轮廓多边形简化方法来进行轮廓拼接. 本文所指轮廓即三维重建虚拟物体的边界.

1 OR 运算和 AND 运算确定轮廓对应

在虚拟物体显示表面的切片级重建中, 轮廓对应是比较难, 也是比较关键的问题之一. 在三维重建成像中, 如果成像深度的分辨率大于成像区域内物体之间的最小距离, 则无论采用那种方式, 都很难正确确定轮廓的对应关系. 深度分辨率一般应比物体之间的最小距离大得多, 例如大 10 倍以上. 在这种情况下, 采用简单的重叠方法就能容易地确定轮廓的对应关系. 这是因为在相邻的两个图象平面中, 两个分离的物体的二维切片不会重叠. 但是, 如果深度分辨率不是很高, 即使采用比较好的轮廓对应方法^[8], 有时也不容易正确确定轮廓的对应关系. 特别对于激光扫描共焦显微生物学三维图象, 由于该图象上有的物体是弯曲的, 有的是分叉的, 有的是有孔的, 等等, 在这种情况下, 若采用轮廓的椭圆拟合和柱体生长^[7,8], 则很难正确确定轮廓的对应关系, 为此, 本文提出一种间隙跟踪的方法来解决轮廓的对应问题. 下面介绍这种方法的基本步骤.

(1) 首先, 采用递进门限^[9]图象分割技术把图象分割成物体区域和背景区域, 然后依次处理两个

相邻图象平面对.

(2) 在 z 和 $z+1$ 两个相邻图象平面中, 采用双边界法区域标号^[10]技术来组建每个二维物体, 并获得每个二维物体的轮廓和方向链码.

(3) 对 z 和 $z+1$ 两个相邻图象平面做 OR 运算和 AND 运算.

(4) 如果 OR 运算结果集 S_{OR} 中只含有一种元素 (如图 1(a) 所示), 且二维物体在 $z+1$ 平面上, 则轮廓对应是一对零或零对一. 在这种情况下, 相应的二维物体或者是底面 (底面在 z 平面上), 或者是顶面 (顶面在 $z+1$ 平面上).

(5) 如果 OR 运算结果集 S_{OR} 中只含有两种元素, 且参加 AND 运算的两个相交边界之间的最大距离 d 大于事先设定的常数门限 T_1 , 即 $d > T_1$, 或者 AND 运算的结果集 S_{AND} 的元素数与参加 AND 运算的最小集合的元素数的比值 R 大于事先设定的常数门限阈值 T_2 , 即 $R > T_2$, 如图 1(b) 所示, 则轮廓对应是一对一. 否则, 无对应关系, 如图 1(c) 所示.

(6) 如果 OR 运算结果集 S_{OR} 中含有多种元素, 如图 1(d) 所示, 则轮廓对应可能是多对多或复合对应. 在这种情况下, 如果 $d > T_1$, 或者 $R > T_2$, 则相应的轮廓是对应的, 否则是无对应的. 无对应的轮廓按步骤 4 处理; 如果对应的轮廓是一对一, 则按步骤 4 处理; 如果对应轮廓是一对多, 则按曲面分叉处理. 如果对应轮廓是多对多, 再按最大距离的大小进行分组. 若组内距离大, 组间距离小, 则每组是一种对应, 如在图 1(d) 中, A' 和 A 间的 d 大, 而和 B 间的 d 小, 故 A 和 A' 对应. 同理, B 和 B' 对应, C 和 C' 对

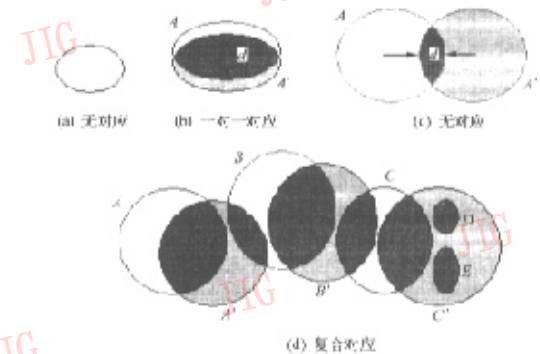


图 1 轮廓对应示意图
(二维物体 A, B, C, D, E 在 z 平面上, 而 A', B', C' 在 $z+1$ 平面上)

应. 又因 D 和 E 与 C' 的 R 大, 故 D, E 和 C' 对应, 且 C, D, E 和 C' 是曲面分叉对应.

2 基于数学形态学方法的分叉曲面分解

进行处理曲面分叉时, 文献[8]提出的方法是通过插入中间临界状态轮廓, 把一对多的轮廓对应分解成一对二的轮廓对应. 但笔者认为, 这种方法有如下两个问题: 第 1 个问题是一对二的分解有时可能不成功, 分解的结果仍然是一对多; 第 2 个问题是一对二的问题, 本质上仍然是一对多的问题. 所以, 本文提出一种把一对多或多对一的轮廓对应, 分解成一对一的轮廓对应的方法. 这种方法是先采用数学形态学的方法来确定多轮廓的分界线, 再用这些分界线把单轮廓分割成相对应的多轮廓, 结果得到一对一的轮廓对应. 下面介绍这种方法的基本步骤.

(1) 如图 2 所示, 在单一轮廓 A' 的区域内, 对多轮廓 A, B, C 做 8 邻域的膨胀运算.

(2) 在膨胀运算中, 任何两个轮廓膨胀的公共点就是轮廓之间分界线上的点.

(3) 多轮廓分界线与单轮廓 A' 的交点 1, 2, 3 就是单轮廓 A' 的分割点.

(4) 重复多轮廓的膨胀运算, 直到在单轮廓 A' 区域内没有任何一点可以膨胀为止.

(5) 在单轮廓分割点 1, 2, 3 处, 把单轮廓 A' 分割成轮廓段 12, 23 和 31, 再把相应的分界线 201, 302, 103 分别加到相应的单轮廓段 12, 23 和 31 中, 即构成封闭的新轮廓 1201, 2302 和 3103. 这种新轮廓和多轮廓就形成一对一的轮廓对应: A 和 1201 对应, B 和 3103 对应, C 和 2302 对应.

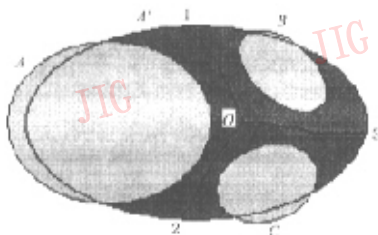


图 2 基于数学形态学方法的分叉曲面分解

图 2 中, 多轮廓 A, B, C 和单轮廓 A' 是多对一的轮廓对应. 深灰色表示多轮廓的 8 邻域膨胀运算结果. 黑色线条 01, 02, 03 是由膨胀运算所得到的多

轮廓的分界线.

3 基于轮廓多边形简化的轮廓拼接

轮廓拼接就是把相邻两个图象平面中的两个相对应的轮廓, 用三角面片连接起来, 以构成一个封闭的曲面(如图 3 所示). 图 3 中, 假设平面 I 和平面 II 是相邻的两个图象平面, 且在平面 I 中有物体切片 A 和 B ; 在平面 II 中有物体切片 A' 和 B' ; 又假设物体切片 A 和 A' 同属一个物体, B 和 B' 同属另一个物体, 则 A 和 A' 的轮廓相对应, B 和 B' 的轮廓相对应, 而轮廓拼接就是把 A 的轮廓($\dots abcde \dots$)和 A' 的轮廓($\dots a'b'c'd'e' \dots$)用三角面片($\dots aa'b', ab'b, bb'c, b'cc', cc'd, c'dd', dd'e, d'ee', \dots$)链接起来, 构成封闭的曲面, 且这个封闭的曲面是一个没有重叠, 没有悬浮, 没有交叉的三角面片.

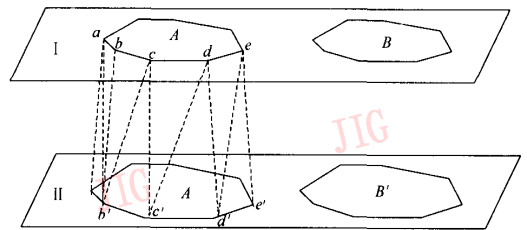


图 3 轮廓拼接

三角面片链接的方式可能是多种多样的, 例如轮廓边 bc 和 $b'e'$ 也可能用三角面片 $b'bc'$ 和 $bc'c$ 来拼接. 到底采用哪种链接方式, 需依赖于采用哪种链接准则. 由此可见, 若链接准则不同, 其链接方式也就不同, 则生成的封闭曲面也就不同, 这也就是说, 拼接生成的封闭曲面不是唯一的. 因为每一种曲面对应一种链接方式和一种优化准则, 所以很难说那种方式、那种优化准则最好, 最符合实际. 轮廓拼接比较常用的一种方法是环形轮廓拼接方法^[4,6], 该方法拼接的优化准则是表面积最小, 或者体积最大, 或者两轮廓之间的跨接边(如图 3 中的虚线所示)之和最短; 另一种方法是弹性匹配轮廓拼接方法^[11,12]. 这两种基本方法的优点是它们都是优化的轮廓拼接方法, 虽然一般拼接效果都很好, 但是由于其优化运算增加了运算量, 即降低了运算速度, 因此在本文的虚拟物体三维重建中, 为了减少运算量和数据量, 以提高显示速度, 采用了轮廓的多边形简化和环形轮

廓拼接方法. 其中, 轮廓多边形简化的基本方法是: 在轮廓检测时, 首先建立轮廓的方向链码; 然后依次搜索方向链码, 其方向改变的点就是多边形的角点, 而方向没有改变的点就是多边形边上的点; 最后保留角点, 去掉边上的点; 于是, 这样就把轮廓简化成了多边形, 并去掉了轮廓直线边上的冗余点. 这样处理, 既减少了轮廓拼接的三角形面片的数量, 又不改变表面的拼接形状. 环形轮廓拼接就是从一个轮廓 (例如图 3 中的 A) 的某个点 (例如 A 中的 a 点) 和与其对应轮廓 (例如图 3 中的 A') 的对应点 (例如 A' 中的 a' 点) 开始, 沿着轮廓线依次用三角面片把轮廓上的点链接起来, 以构成一个封闭曲面. 在环形轮廓拼接中, 本文采用跨接边长度最短, 而不是采用跨接边长度之和最短来作为优化准则. 这样由于就避免了轮廓拼接的迭代运算, 从而不仅提高了运算速

度, 而且不影响总体的轮廓拼接形状.

4 实验结果与讨论

为验证本文方法的效果, 采用本文提出的 OR 运算和 AND 运算来确定轮廓对应, 用数学形态学方法对分叉曲面进行分解和用基于轮廓多边形简化的轮廓拼接方法, 做了一些虚拟物体的三维表面重建的实验. 这里我们给出其中的两个例子. 图 4(a) 是一个三分叉虚拟物体三维重建的侧上方俯视图. 图 4(b) 是它的隐藏线网线结构图. 图 4(c) 和 (d) 分别是它们的侧下方仰视图. 从图中可以看出, 采用基于数学形态学方法的分叉曲面分解和基于轮廓多边形简化的轮廓拼接方法, 能得到比较满意的三维表面重建效果.

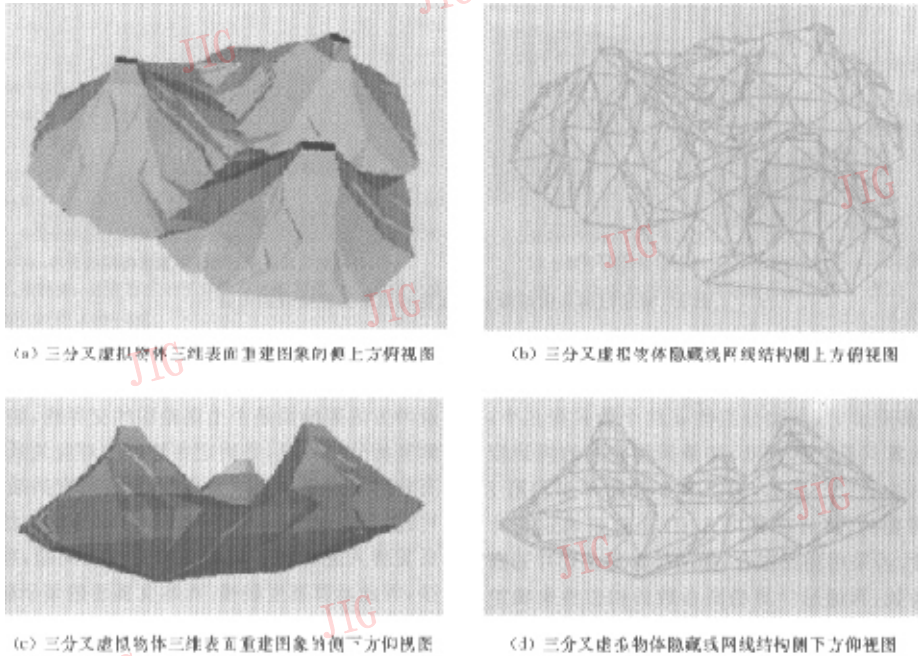


图 4 三分叉虚拟物体三维表面重建视图

图 5(a) 是激光扫描共焦显微生物细胞核三维图像中间 4 张光学切片的二维图像. 在进行该显微生物细胞核三维表面重建时, 首先, 将细胞核三维图像经过中值滤波, 然后采用 Luo 的三维图像分割方法^[9]来得到三维二值图像; 然后对得到的三维二值图像, 采用 Luo 的二维边缘跟踪法^[10]来得到细胞核切片的二维轮廓和轮廓的方向链码. 图 5(b) 是细胞核激光扫描

三维图像的中间 4 张切片图像细胞核影像的轮廓线. 图 5(c) 是虚拟细胞核三维表面重建的平滑显示. 图 5(d) 是虚拟细胞核三维表面重建的网线显示.

由实验结果可以看出, 本文的理论和方法与预期的实验结果是完全吻合的. 本文提出用 OR 运算和 AND 运算来确定轮廓对应, 算法比较简单, 运算速度比较快. 这是因为在第 2 节中, 第 3 步的 OR 和

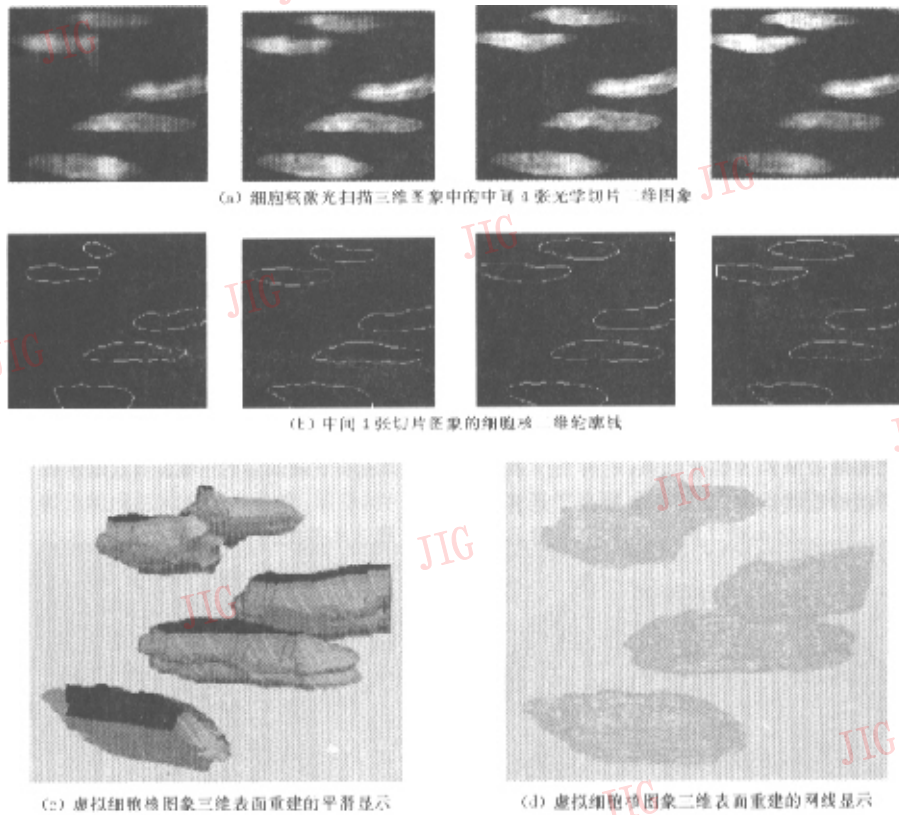


图5 激光扫描共焦显微生物细胞核图象的三维表面重建

AND 运算很简单,且其后 d 的运算也不需要两个相邻切片的所有点,而只需要相交部分的边缘点的缘故;在多对多时,参加分组的 d 的个数只有几个;其余的运算只是逻辑判断.如果采用轮廓的椭圆拟合或柱体生长^[7,8],那么,第2节中的第1步和第2步也是需要的,其后需要用 AND 运算来确定切片的连通性,若采用椭圆拟合,则需计算每个切片的椭圆拟合参数,再通过计算椭圆参数的相似性来确定切片的对应关系;若采用柱体生长,则需要计算每个切片的重心,再进行这些重心的曲线拟合,最后根据重心到曲线的距离来确定切片的对应关系,这就导致算法较复杂,且运算速度较慢.本文提出的基于数学形态学方法的分叉曲面分解,能同时解决一对多的分叉曲面的轮廓对应问题,因为采用膨胀运算可得到对应多个切面的分界线,一对多或多对一的问题马上就化成一对一的问题,所以不存在第3节中所说的两个问题.另外,在进行膨胀运算时,由于只需要计算与多个切面不对应的点,程序较简单,因此

运算速度较快.如果采用插入中间临界状态轮廓的方法^[8],则必须在一对多之间反复插入轮廓层,由于这种方法需检测是否出现轮廓的交界线,如果出现,则需拆分交界线,并确定各轮廓的对应关系,直到所有轮廓都变成一对一为止,而且在每次的插入中,还可能在一对多或不出现交界线的问题,由于这种反复插入还存在运算收敛和速度的问题,程序较复杂,因此运算速度较慢.而本文提出的基于轮廓多边形简化的轮廓拼接方法,则由于可以去除轮廓直线边上的冗余点,从而减少了用于轮廓拼接的三角形面片的数量,即减少了运算量,因减少了数据量,故提高了显示速度.

参考文献

- 1 Herman G T, Liu H K. Three-dimensional display of human organs from computed tomograms[J]. Computer Graphics Image Processing, 1979,9(1):1~21.
- 2 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm [J]. Computer Graphics,

- 1987,21(4):163~169.
- 3 Cline H E, Lorensen W E. Two algorithms for the 3D reconstruction of tomograms[J]. Medical Physics, 1988,15(3): 225~233.
 - 4 Keppel E. Approximating complex surface by triangulation of contour lines[J]. IBM J. Research and Development, 1975, 19(1):2~11.
 - 5 Kehtarnavaz N, de Figueiredo R J P. A framework for surface reconstruction from 3D contours[J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1988,42(1):32~47.
 - 6 Chang L W, Chen H W, Ho J R. Reconstruction of 3D medical images: A nonlinear interpolation technique for reconstruction of 3D medical images [J]. Computer Vision Graphics Image Procession: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(4):298~309.
 - 7 Meyers D, Skinner S, Sloan K. Surfaces from contours[J]. ACM Transactions on Graphics, 1992,11(3):228~258.
 - 8 管伟光. 体视化技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 1998:71~83.
 - 9 Luo D, Daly C, MacGrath J C. Iterative multilevel thresholding and splitting for 3D segmentation of live cell nuclei using laser scanning confocal microscopy[J]. Journal of Computer-Assisted Mircoscopy, 1998,10(4):151~162.
 - 10 Luo D. Pattern recognition and image processing [M]. Chichester, UK:Horwood Publishing, 1998:20~23.
 - 11 Moshfeghi M, Ranganath S, Nawyn k. Three-dimensional elastic matching of volumes [J]. IEEE Trans. On Image Processing, 1994,3(2):128~138.
 - 12 管伟光,马颂德. 具有形变的平面轮廓匹配问题[J]. 自动化学报,1996,22(6):666~671.



何小海 1964年生,教授,现为四川大学电子信息学院在职博士研究生。主要从事模式识别、计算机视觉、图象处理、图象通信等教学和研究工作。



罗代升 1995年获英国格拉斯哥大学博士学位,教授。现从事模式识别、计算机视觉、图象处理、图象通信等教学和研究工作。



陶青川 现为四川大学电子信息学院在职博士研究生,助教。现从事模式识别、计算机视觉、图象处理、图象通信等教学和研究工作。



吴晓红 2000年年获四川大学硕士学位,助教。现从事图象处理、图象通信、DSP、计算机控制等教学和研究工作。

冉均国 教授。现从事生物医学工程、生物医学材料、生物医学信息处理等教学和研究工作。