

基于几何图像的三角网格分割*

李奇敏¹ 柯映林² 何玉林¹

(1. 重庆大学机械工程学院 重庆 400044; 2. 浙江大学机械与能源工程学院 杭州 310027)

摘要: 对反求工程中三角网格数据的分割算法进行研究, 提出一种基于几何图像的三角网格分割方法。在网格参数化的基础上, 改进几何图像的生成方法。结合形态学方法, 用去除逼近项小波重建方法和梯度图像方法两种方法分割法矢图像, 基于阈值法分割曲率图像, 把几何图像的分割结果映射回到原始网格。实例表明基于几何图像的三角网格分割方法对没有复杂自由曲面的网格数据可以取得较好的分割效果。

关键词: 三角网格 几何图像 小波 梯度图像 分割

中图分类号: TP391

Triangular Mesh Segmentation Based Geometry Image

LI Qimin¹ KE Yinglin² HE Yulin¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The segmentation algorithm of triangular mesh in reverse engineering is studied. A geometric image based segmentation method is proposed. The generation method of geometric image is improved on the basis of parametrization of mesh. Combined with morphological method, two segmentation methods of normal image are proposed. One is based on wavelet reconstruction in which the approximation term is removed, and the other is based on gradient image. The threshold segmentation method of curvature image is also studied. The segmentation result of geometric image is mapped back to original mesh. Example illustrates that the geometric image based segmentation method can achieve satisfactory result for mesh data without complex free form surface.

Key words: Triangular mesh Geometry image Wavelets Gradient image Segmentation

0 前言

如何得到既满足功能要求又有美观外形的CAD模型是机械零件反求的关键。而这样做的前提是对大规模点云数据或者网格数据进行正确分割。这里的分割是指将测量数据划分为特征单一、互不重叠的区域^[1]。但是已有的研究主要集中在点云数据的分割上, 对网格数据分割的研究还很少。现在的点云数据三角化技术越来越成熟, 直接由点云数据通过三角化得到三角网格已经很容易。而且在工程实际中用三角网格表达的模型也越来越多, 而在三角网格上操作比直接在点云上操作要方便得多, 因此在反求工程中就出现了对三角网格进行分割的要求。已有的网格分割方法主要有两类, 一类是基

于顶点的网格分割, 另一类是基于边的分割。

基于顶点的网格分割方法是指对网格上的每一个顶点 v_i 关联一个值 l_i , l_i 包含顶点的几何信息如曲率、法矢等, 根据 l_i 把网格分割为一个个具有相近的 l_i 值(在一个容差范围内)的区域, 这些区域由连接的顶点组成。通常的方法选择曲率作为 l_i , 有相似曲率值的顶点放在一个区域内, 区域之间是曲率值大的顶点或者曲率变化较大的顶点组成的边界。在基于顶点的分割算法中 MANGAN 等^[2]推广了图像处理中的分水岭算法, 把这个算法用于网格的分割。他们把曲率作为一个高度场, 利用最小深度控制两个片之间的合并操作。PAGE 等^[3]基于人的视觉特性的极小准则提出了一个改进的分水岭算法。但是这两个算法存在过合并和欠合并及边界问题。

基于边的分割算法利用二面角定义的特征边形成特征边界, 利用特征边界把网格分割为几个区域。这个方法的缺点是可能导致许多不连接的特征边,

* 重庆大学引进人才资助项目启动基金(0903005104967)和重庆大学机械工程学院引进人才启动基金资助项目。20070512 收到初稿, 20071223 收到修改稿

结果使得特征环不完整。

为了克服基于点和基于边的分割方法的缺点，RAZDAN 等^[4]提出了一个结合分水岭算法和基于二面角提取特征边的混合方法。但是这种方法仅能提取高曲率边界包围的区域，而且不能识别过渡区域。

以上区域分割方法都是直接在原始网格数据上进行的，噪声、不均匀等数据缺陷对分割结果的影响非常大。如果把网格数据的分割转化到规则域上进行，利用规则域上成熟的数字信号处理技术来实现网格的分割，就可以较好地解决直接分割方法中存在的问题，减少噪声等缺陷的影响。

几何图像是把网格数据转化为规则域数据的方法之一，它通过把任意网格参数化到平面上生成能存储模型各种属性的图像，进而利用图像处理中的各种方法处理网格。这种方法很好地解决了网格模型的绘制和压缩^[5]。而在图像处理中，图像分割技术已经过多年研究，有很多成熟的方法可以利用。这使人自然地想到把几何图像用于网格数据的分割。在这种思路下，首先对几何图像的生成方法进行了改进，然后给出了几何图像的分割算法，最后把分割结果映射回原始网格，得到最终的分割结果。

首先给出基于几何图像的三角网格分割的总体流程：① 三角网格参数化。② 平面三角网格采样生成几何图像。③ 几何图像分割。④ 分割结果映射回原始网格。下面按这个流程逐一进行论述。

1 三角网格向二维网格转化

1.1 网格参数化

网格参数化包括把曲面分解为一组面片，在面片和参数域之间建立一一映射。网格参数化在计算机图形学中主要应用于纹理映射、变形、曲面重建和修复以及栅格生成。把网格的参数化用于网格的分割，这里参数化的主要目的是生成网格的几何图像，以用相对成熟的图像分割方法实现网格的分割。为了使得几何图像尽量能体现原始网格的几何信号分布，要求参数化能够尽量保持原始三角网格上三角形的面积和形状，即保角、保面积、保边长之比。

FLOATER^[6]对已有网格参数化的方法作了很好的综述，很多参数化方法是基于纯粹的数学理论(如保角映射)，对于在实际中很重要的低伸缩率的网格参数化还没有非常有效的算法。SANDER 等^[7-8]、PRAUN 等^[9]、SORKINE 等^[10]、MAILLOT 等^[11]、ZHANG 等^[12]按各自的方法给出了伸缩量的度量，并通过最小化这些伸缩度量值来实现网格的

低伸缩率的参数化。SHIN 等^[13]在 FLOATER^[6]的保形参数化算法的基础上，通过最小化加权二次能量逐渐对已有的参数值进行优化，以使得参数化的伸缩量最小。当参数域的边界是凸多边形时，这个优化过程不会导致三角形的翻转。由于本文主要针对反求工程中与圆盘拓扑同胚的网格模型的分割，要把网格上的几何信号转化为二维的几何图像，利用图像分割的方法实现网格数据的分割，因此选择 SHIN 的保角、保面积网格参数化算法。

图 1 是一张中间凸起的网格及其参数化的结果。图 2 是参数化前后相对面积之比的直方图，这里相对面积是指三角形面积相对于总面积的比值。可以看到相对面积之比主要分布在 1 到 3 之间，说明参数化的结果还是比较均匀。

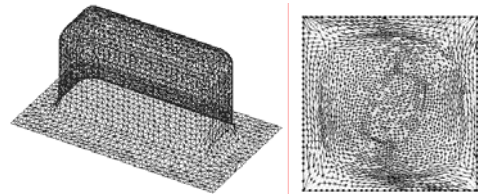


图 1 网格参数化

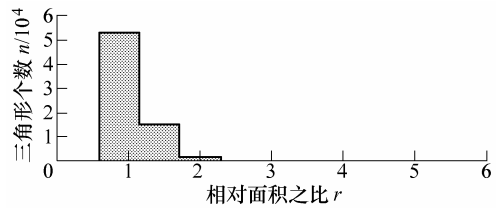


图 2 参数化前后相对面积之比直方图

1.2 由几何信息生成网格纹理图

几何图像是指反映网格上几何信息如曲率、法矢、主方向等分布情况的图像。生成网格的几何图像首先要把网格上各个顶点的几何信息求出，本文所用到的几何信息有法矢、最大主曲率、最小主曲率、平均曲率和 Gauss 曲率。关于网格上的微分量的计算有很多研究，HAMANN^[14]、CALLADINE^[15]和 KOBELT^[16]用局部拟合的二次多项式估算 3D 网格的曲率，本文采用 CALLADINE 的方法计算网格上的微分量。

为了用统一的框架处理不同的几何信息，需要把顶点的几何信息转化为颜色信息。作这样转化的主要目的在于利用人眼对色彩的敏感性，通过把几何信息转化为颜色信息来提高人对网格几何信号的分辨能力，同时这也是对几何信号进行量化的一个过程。GU 等^[5]对几何信息转化为颜色信息进行了研究，李奇敏等^[17]对其进行了改进。采用李奇敏等^[17]给出的几何信息转化为颜色信息的方法可以得到较

好的纹理。图 3 是对汽车内饰件平均曲率形成的网格纹理图进行中值滤波的结果。图 4 是图 1 中的网格由顶点法矢和曲率生成的网格纹理图。

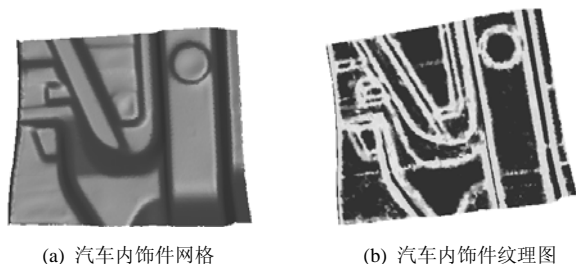


图 3 中值滤波网格纹理

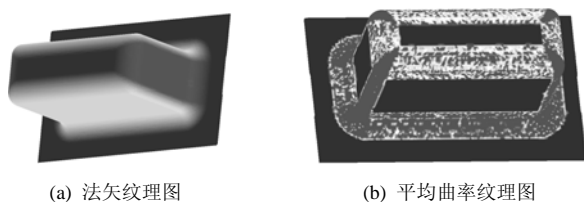


图 4 平均曲率生成的网格纹理

1.3 几何图像生成

生成网格上的几何纹理之后,就可以通过在参数域的栅格点均匀采样生成几何图像。由于所处理的数据相对计算机图形学中所处理的复杂模型简单得多,由参数化引起的变形也不是很大,因此采用简单的均匀采样,其中图像的像素数目由网格的三角片数目决定。为了使得图像的采样密度足够,几何图像的总的像素数目与网格的三角面片数目一致,而长宽则由矩形参数区域的长宽比例决定。

对于一个采样点,首先决定它在参数域网格中的位置,即位于哪一个三角形之内,然后才能通过插值获得该像素点位置的颜色值。DEVROYE 等^[18]给出了单个点在平面 Delaunay 三角网格上的定位算法,对于一个目标点 Q : ① 在平面网格上随机抽取 m 个点。② 从这 m 个点中查找离目标点最近的点作为参考点 P 。③ 连接直线段 PQ ,在与直线段 PQ 相交的三角形中通过点在三角形内外确定 Q 的位置。

对于栅格点阵,由于它的点之间有相邻关系,因此除了第一个点之外,参考点的查找不需要随机抽取,只要由它的相邻点确定即可。对于非 Delaunay 三角网格上点的定位则采用本文提出的递归方法实现。

(1) 先判断 Q 是否在参考点 P 的相邻的三角形 $\{T_i\}$ 内,如果是则输出目标点所在的三角形 T_q , 返回,否则到(2)。

(2) 在参考点 P 的相邻的三角形 $\{T_i\}$ 中查找 P 的对边 e 和线段 PQ 相交的三角形 T_r ,把网格中 e 的

另一个相邻三角形 T_l 中和 e 相对的顶点作为参考点 P , 转(1)。

具体如图 5 所示。

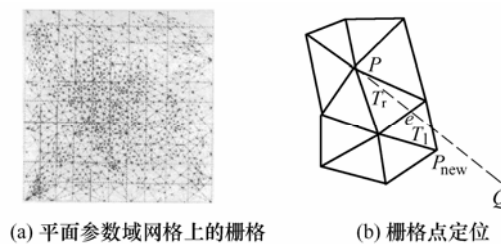


图 5 栅格点的定位

栅格点定位之后,就可以由该点在所在三角形的重心坐标通过三角形上的线性插值获得该点的颜色值。假设三角形 T 的三个顶点 P_1, P_2, P_3 的颜色值为 C_1, C_2, C_3 , 点 P 在三角形 T 中的重心坐标为 (a, b, c) , 则点 P 处的颜色值 $C_p = aC_1 + bC_2 + cC_3$ 。图 6 是由图 4 中网格纹理得到的几何图像。由图 6 可见,几何图像基本可以真实地反映网格上的几何信息分布的情况,同时对原始网格上的噪声起一定的平滑作用。

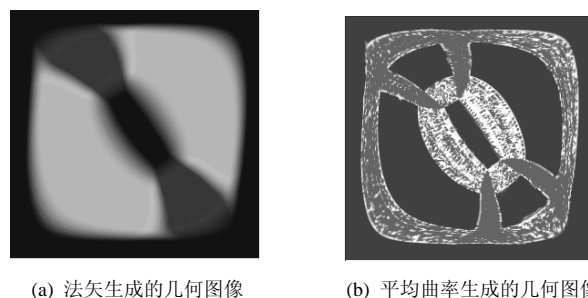


图 6 由法矢和平均曲率生成的几何图像

2 几何图像分割

这里图像分割的目的是把几何图像分割为若干具有单一属性的区域,使得一个区域对应网格上的一个特征曲面。首先对几何图像进行分析,如图 6a 的法矢图像总共有 5 个平面区域,对应于几何图像上 5 个颜色单一的区域,它们之间通过过渡连接,对应于几何图像上各个单一颜色区域之间颜色渐变的区域。而在图 6b 中,由平均曲率生成的几何图像各平面区域的颜色一致,过渡区域和平面区域之间的颜色差别很大。所以对于法矢图像,要检测的是梯度不连续变化的区域也就是网格上曲率不连续的区域,而对曲率图像则只需检测颜色的突变区域。与法矢图像相比,曲率图像由于网格顶点曲率计算受噪声干扰的程度比法矢计算时大,因此法矢图像

的质量要比曲率图像好，但是曲率图像的分割则要比法矢图像的分割简单。这里分割的主要依据是在几何图像上过渡区域颜色的变化，在法矢图像上，过渡区域是颜色逐渐改变的区域，而曲率图像上过渡区域和特征曲面之间的颜色差别较大，这都可以作为分割的依据。

图像分割是指把图像按纹理、颜色和灰度等信息分割为多个区^[19]。现有的图像分割方法主要有阈值法、区域法和边缘检测方法等，基于这几种方法结合各种数学理论和工具又衍生出一些新的图像分割技术，包括数学形态学方法、统计模式识别理论、人工神经网络技术、信息论理论、模糊集理论、小波变换技术、遗传算法和水平集方法等。这些分割方法的主要目的是提取图像中感兴趣的区域，以便进一步地分析，而几何图像分割的主要目的是把属于不同特征区域的数据分割出来，为下一步曲面拟合作准备，因此对边界准确性有一定的要求。

2.1 基于小波的法矢图像分割

对于法矢图像，如果各个特征区域之间通过过渡连接，则过渡区域和特征区域之间的颜色没有明显的跳变(法矢连续)。而法矢图像的梯度图像在过渡区域和特征区域之间的颜色则变化明显，这是因为法矢图像的梯度图像相当于网格的曲率图像，曲率的不连续就导致法矢图像的梯度图像颜色的变化。因此在分割过程中，需要突出法矢图像在过渡区域的颜色逐渐改变的性质。图 7a 是由图 6a 中的法矢图像所转化的灰度图像，图 7b 是图 7a 中间一个断面的灰度变化情况，可以看到该断面上有四个颜色变化的区域。

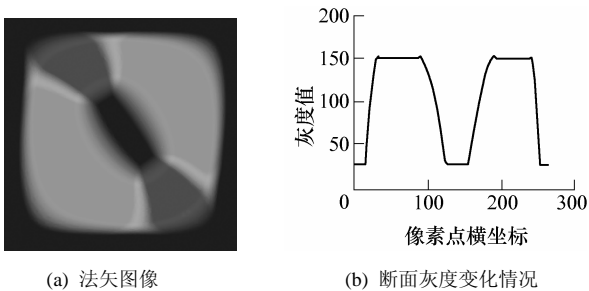


图 7 图 6a 中法矢图像及其中间断面灰度变化情况

由于小波分解能够分离图像中的低频部分(颜色均匀区域)和高频部分(颜色变化区域)，因此采用小波分解来实现过渡区域的提取。首先对图像进行一次小波分解，然后把逼近部分设置为 0，在此基础上再进行重建，这样就可以突出过渡区域。图 8 是图 7a 的小波分解的结果。图 9 是图 7 的灰度图像经过过去逼近项重建后的图像及其断面灰度变化情况

况，可以看到过渡区域在这里已经凸现出来。

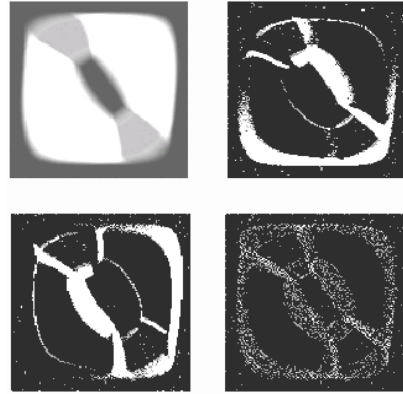


图 8 图 7a 的小波分解

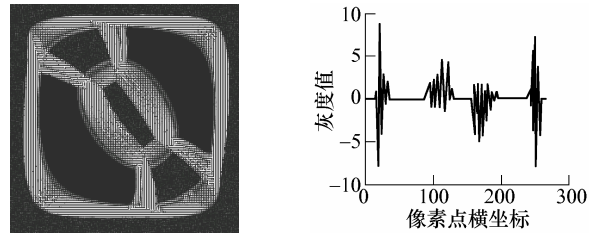


图 9 图 7a 去除逼近项重建图像及其断面灰度变化情况

但是这里图像的灰度值有正有负，不利于进一步处理，因此对整幅图像取绝对值，在此基础上再把图像转化为二值图像。图 10a 是对图像取绝对值后的图像，图 10b 是二值化后的图像。

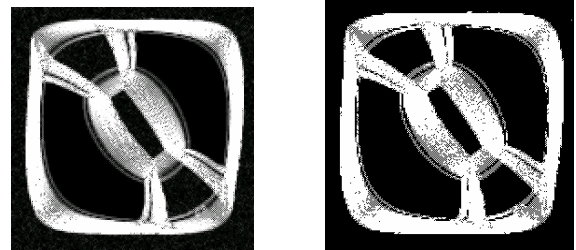


图 10 图 9a 取绝对值后的图像和二值化的结果

在具体实现过程中，采用的小波是 Haar 小波，为了避免边界效应首先要对图像进行延伸，这里采取的办法让图像向四个方向同时长大，延伸部分的颜色按图像边界颜色赋值。为了避免噪声的干扰，对图像进行自适应的 Wiener 滤波滤除噪声。在由灰度图像向二值图像转化时，阈值取为由灰度直方图计算出的全局阈值。

由图 10b 可以看到，所得到的过渡区域上有一些孔洞和不连续的区域，为了消除这些缺陷，用数学形态学方法把整个过渡区域合并为一个整体。图 11 是对图 10b 进行闭合操作的结果。其中闭合所用的结构元素是以 5 为半径的圆盘。

对由过渡区域分离的区域，用不同的颜色进行

填充就可以得到各个特征区域。图 12 是对图 11 填充的结果。



图 11 图 10b 闭合操作的结果 图 12 图 11 填充颜色

2.2 基于梯度图像的法矢图像分割

由第 2.1 节的叙述可知, 法矢图像的梯度图像在过渡区域和特征区域之间的颜色变化明显, 因此也可以借助梯度图像来实现法矢图像的分割。梯度对应于一阶导数, 对于连续函数 $f(x, y)$, 其在 (x, y) 处的梯度定义如下

$$\nabla f(x, y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)^T = (G_x, G_y)^T$$

已有的图像处理方法用梯度算子来检测图像的边缘, 有 Roberts 算子、Prewitt 算子和 Sobel 算子, 这些算子都假定图像在边缘处发生突变, 主要用于处理阶跃形边缘、脉冲边缘和屋顶边缘, 并不能满足法矢图像分离过渡区域的要求。为此, 作者提出了一种基于梯度图像的法矢图像分割方法。

首先定义法矢图像的梯度图像为 $|\nabla f| = (G_x^2 + G_y^2)^{1/2}$, 如图 13a 所示是图 7 的梯度图像, 受噪声和边界的影响, 图 13 中出现了一些麻点, 为了避免这个影响, 首先对图像进行延伸, 延伸方法和第 2.1 节的方法相同, 然后用自适应的 Wiener 滤波去噪, 再求梯度图像得到图 13b 所示的图像, 其上噪声和边界的影响已经去除, 得到非常好的边界。然后将其转化为二值图像, 再对其进行闭合操作就可以得到完整的过渡区域。如图 14 所示。

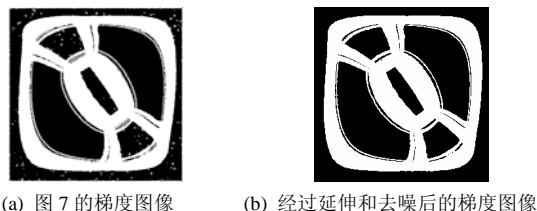


图 13 基于梯度图像的法矢图像分割



图 14 基于梯度图像的法矢图像分割结果

2.3 曲率图像分割

对于曲率图像, 由于过渡区域的曲率值相对较大, 在灰度图像中和其他特征区域的灰度差别较大, 可以采用阈值法直接对其进行分割。对图 6b 分割的结果如图 15 所示。其中阈值的选取根据图像的灰度直方图决定, 本文采用的是最优阈值^[19]。



图 15 基于阈值法的曲率图像分割

得到分离好的图像区域后, 还需要把分割结果映射回到网格, 采用划格子的办法, 即先在参数域中确定网格上的顶点所在的图像栅格, 然后根据栅格的四个角点的颜色确定网格顶点的颜色, 如果四个角点颜色一致, 则该顶点为区域内部顶点, 直接把角点颜色赋给该顶点, 否则把距离该顶点最近的角点的颜色赋给它。这样很容易就把分割结果映射回到原始网格上。图 16 是把图 14 映射回网格后得到的分割结果。



图 16 图 14 分割结果映射回网格

3 几何图像实现网格分割实例

下面再给出用几何图像实现网格分割的几个例子。图 17 是某一摩托车反光镜的测量数据及其几何图像。图 17b 和图 17c 是由法矢和曲率生成的纹理图, 图 17d 和图 17e 是各自对应的几何图像。由图可见法矢图像受噪声干扰较小, 而曲率图像图 17e 由于是二阶量, 其估算受噪声影响很大。图 18 是基于法矢图像对其进行分割的结果, 其中图 18a 是对法矢灰度图像利用小波去除逼近项重建后得到的图像, 图 18b 是对其取绝对值后的图像, 图 18c 是对图 18b 经过二值化和形态学处理后的图像, 可以看到各个法矢渐变的区域已经和平面区域分离, 图 18d 对各个特征区域填充颜色, 图 18e 是把图像分割结果映射回网格得到的最终分割结果。图 19 是用阈值法对曲率图像分割的过程, 首先把曲率图像转化为灰度图像, 然后利用阈值法实现图像分割, 最后用形态学闭合操作合并麻点区域。

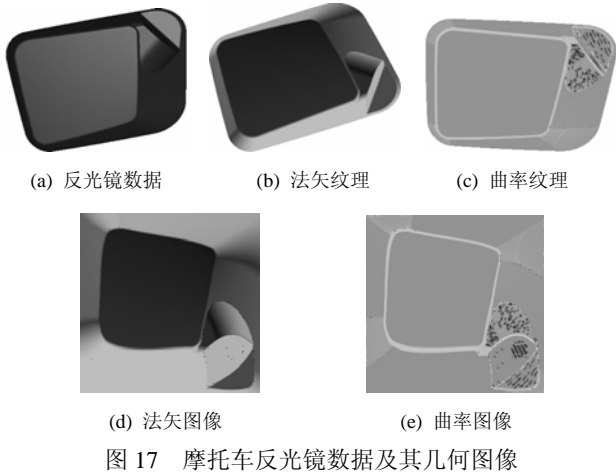
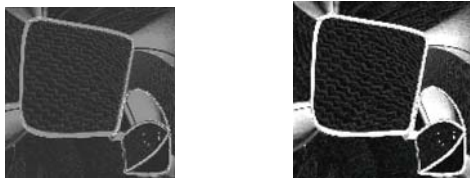


图 17 摩托车反光镜数据及其几何图像



(a) 法矢图像去逼近项小波重建 (b) 重建图像取绝对值



图 18 基于法矢图像的反光镜分割图



图 19 基于曲率图像的反光镜分割图

用图切割方法^[17]对反光镜数据进行分割,图 20 是基于图切割的反光镜分割的结果。其中图 20a 是利用直方图均衡化后得到的曲率纹理图,图 20b 是利用图 20a 的纹理图分割的结果,图 20c 是利用图 17b 的法矢纹理图分割的结果。



图 20 基于图切割的反光镜分割图

对这几种分割方法进行比较,基于曲率的分割方法受噪声干扰比较严重,而基于法矢的分割方法受噪声干扰的程度要小得多。基于图的分割方法,由于其算法本身的缺点,容易把小的特征区域合并,

或者把大的区域分离,如对图 20b 的分割就把反光镜安装部分的平面区域和圆柱区域合并到一起。基于几何图像的方法可以克服这个缺点,而且在几何图像中很多成熟的图像处理方法(Wiener 滤波、小波、形态学操作)可以直接使用,带来了很大的便利,但是基于几何图像的分割方法需要参数化,增加了分割所耗费的时间。下表列出了几种分割方法各自的特点。

表 几种分割方法比较

分割方法	参数化	噪声干扰	时间花费	能分割自由曲面	适用范围
曲率纹理+图	否	严重	少	是	任意拓扑曲率突变
法矢纹理+图	否	较小	少	否	任意拓扑法矢突变
曲率图像	是	较重	多	是	圆盘同坏曲率突变
法矢图像	是	小	多	否	圆盘同坏曲率不连续但法矢连续或突变

4 结论

在基于特征的反求工程中,数据的特征区域分割占有重要的地位,针对三角网格数据的区域分割进行了研究,提出了利用几何图像实现三角网格分割的方法,改进了几何信息向颜色信息映射及几何图像生成的方法,提出了基于小波变换和梯度图像实现法矢图像分割的方法,并把分割的结果映射回原始网格。结合实例对基于几何图像的区域分割方法和基于图切割的分割方法进行了比较:基于几何图像的分割方法需要参数化,比较费时而且要求数据与圆盘拓扑同坏,但是可以很好地抑制噪声;基于图的分割方法,不需要参数化,分割速度较快,可以处理任意拓扑的网格,但是对噪声比较敏感。

实际的应用表明,对不包含复杂自由曲面的网格模型,利用提出的方法可以取得较好的分割效果。对于有复杂自由曲面的网格模型,由于自由曲面的曲率或法矢在某些局部和相邻曲面的曲率或法矢接近,如何防止自由曲面区域并入相邻区域发生误分割,有待进一步的研究。

参 考 文 献

[1] VARADY T, MARTIN R, COXT J. Reverse engineering of geometric models: an introduction[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255-268.

[2] MANGAN A P, WHITAKER R T. Partitioning 3d surface meshes using watershed segmentation[J]. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(4): 308-321.

- [3] PAGE D L, KOSCHAN A F, ABIDI M A. Perception based 3d triangle mesh segmentation using fast marching watersheds[C]// IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, WI, United States, 2003: 27-32.
- [4] RAZDAN A, BAE M. A hybrid approach to feature segmentation of triangle meshes[J]. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(9): 783-789.
- [5] GU X, GORTLER S, HOPPE H. Geometry images[C]//SIGGRAPH Conf. Proc, United States, ACM Press, 2002: 355-361.
- [6] FLOATER M S. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 1997, 14(3): 231-250.
- [7] SANDER P V, SNYDER J, GORTLER S J, et al. Texture mapping progressive meshes[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH, Los Angeles, CA, 2001: 409-416.
- [8] SANDER P V, GORTLER S J, SNYDER J, et al. Signal specialized parametrization[C]//Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering, Pisa, Italy, 2002: 87-98.
- [9] PRAUN E, HOPPE H. Spherical parametrization and remeshing[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH, San Diego, CA, United States, 2003: 340-349.
- [10] SORKINE O, COHEN D, GOLDENTHAL R, et al. Bounded-distortion piecewise mesh parameterization[C]// Proceedings of IEEE Visualization, Boston, MA, United States, 2002: 355-362.
- [11] MAILLOT J, YAHIA H, VERROUST A. Interactive texture mapping[C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH, Anaheim, CA, USA, 1993: 27-34.
- [12] ZHANG E, MISCHAIKOW K, TURK G. Feature-based surface parameterization and texture mapping[R]. Georgia Institute of Technology, 2003. Gvu Tech. Report 03-29.
- [13] YOSHIKAWA S, BELYAEV A, SEIDEL H-P. A fast and simple stretch-minimizing mesh parameterization[C]// Proceedings-Shape Modeling International SMI, Genova, Italy, 2004: 200-208.
- [14] HAMANN B. Curvature approximation for triangulated surfaces[J]. *Computing*, 1993, 8 (Supplement): 139-153.
- [15] CALLADINE C. Gaussian curvature and shell structures[M]. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- [16] KOBBELT L. Discrete fairing and variational subdivision for free-form surface design[J]. *Visual Computer*, 2000,16(3/4): 142-158.
- [17] 李奇敏, 柯映林, 李江雄. 基于图的网格分割[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, 41(5): 746-751.
LI Qimin, KE Yinglin, LI Jiangxiong. Graph based mesh segmentation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(5): 746-751.
- [18] DEVROYE L, MUCKE E P, ZHU B. A note on point location in delaunay triangulations of random points[J]. *Algorithmica*, 1998, 22(4): 477-482.
- [19] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHANG Yujin. Image segmentation[M]. Beijing: Science Press, 2001.

作者简介: 李奇敏, 男, 1976 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为反求工程、曲线、曲面造型技术和小波分析, 发表论文 6 篇。

E-mail: qimin_lizj@sohu.com