

Three Dimensional Reconstruction of Porous Media X-CT Image

Weiguo Qiu, Baoming Chen, Heming Yun, Pengfei Cai

School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan

Email: giuwgsjtu@126.com

Received: Oct. 21st, 2014; revised: Nov. 19th, 2014; accepted: Nov. 25th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

ImageJ, an open source code image processing software, is rarely introduced in porous media reconstruction. Through the use of ImageJ software, a group of sponge X-CT slices was processed. The application of ImageJ in the X-CT image 3D reconstruction is introduced. In order to better use the ImageJ to three-dimensionally reconstruct the porous media X-ray CT image, this paper gives the main methods of operation and the results of the three-dimensional image reconstruction. For establishing the three-dimensional reconstruction of the porous media model, this paper used the method of the numerical simulation which lays a good foundation for the further research on the micro flow and the heat transfer mechanism.

Keywords

Porous Media, 3D Reconstruction, Image Processing, ImageJ

多孔介质X-CT图像的三维重建

邱伟国, 陈宝明, 云和明, 蔡鹏飞

山东建筑大学热能工程学院, 济南

Email: giuwgsjtu@126.com

收稿日期: 2014年10月21日; 修回日期: 2014年11月19日; 录用日期: 2014年11月25日

摘要

ImageJ这款开放源代码的图像处理软件在多孔介质重建方面介绍很少。通过使用ImageJ软件对一组海绵

的X-CT切片进行处理,着重介绍了ImageJ在X-CT图像三维重建中的应用。本文给出了进行三维图像重建主要的操作方法和几种多孔介质重建的图,为更好地使用ImageJ对多孔介质X-CT图像三维重建,给出了进行三维图像重建主要的操作方法和重建结果。对于重建的三维多孔介质模型,利用数值模拟的方法为进一步研究微观流动及传热机理奠定了良好的基础。

关键词

多孔介质, 三维重建, 图像处理, ImageJ

1. 引言

多孔介质中的流体流动与传热不仅与流体本身的物性有关外,还与多孔介质孔隙空间的结构分布有着重要的关系。由于多孔介质孔隙的空间结构和连通性非常复杂,很难用几个明确的参数来描述。为了揭示多孔介质渗流微观机理需要明确多孔介质的孔隙空间、连通性及微观孔隙结构,但是微观尺度流动的渗流理论研究和实验室条件十分有限,很难从微观机理上深入研究流体的流动及传热规律。得到了精确多孔介质微观尺度的模型,接着利用该模型来做数值模拟计算,可能揭示微观流动传热机理。通过 X-CT 图片三维重建是获得多孔介质孔隙空间三维图像有效手段之一。基于数字图片信息和统计的规律,重建两相和多相多孔介质微观结构技术获得了广泛应用,如 Narsilio 等[1]基于微观 CT 扫描图像生成三维孔隙网络结构,研究微观结构对渗透系数的影响,该方法尤其适用于非流体或单相流体系统。

工业 X-CT 是一种最佳无损检测技术之一,不损伤被检测对象的特性,在航空、航天、国防、机械、电子、石油及电力等领域有着广阔的应用前景[2]-[4]。X-CT 图像三维重建是时多孔介质模型重建方法之一,属于物理实验方法这一类,另一类方法是数值重建方法。用 X 射线做 CT 扫描通过重建获取多孔介质的三维图像是一种非常有效的方法,具有精度高、不破坏原始样品的优点。X 射线扫描图像三维重建法是获取多孔介质三维图像的最准确方法,而且该方法也适用于一些非岩石类的多孔介质[5]。应用 X-CT 扫描序列切片重建三维模型基本过程为:处理好欲扫描的实验样品的外形;用工业 CT 机按设定的切片间距逐层扫描得到二维切片图像;将得到的一系列扫描图片进行图片处理,再一步进行三维重建[6]。

2. 二维图像操作

ImageJ [7]是一个功能非常强大、可二次开发的图像处理开源软件,该软件最初是由美国国立卫生研究院(NIH, National Institutes of Health)发起的,可用于 Windows、Mac OSX 和 Linux 等操作系统。ImageJ 可以对多种二维平面图像编辑、处理和分析,用于帮助分析工程实践中的各类图像,已经应用于越来越多的学科,尤其是医学和生物学领域。目前全球很多著名的实验室把 ImageJ 应用于自己的研究,不同学科基于 ImageJ 平台进行二次开发可以解决各自专业的问题,目前针对该软件的插件超过 500 多种,宏超过 300 个。ImageJ 可以对二维图像进行重建来构成三维立体模型,CT 图像的三维重建,广泛应用在医学成像领域中,能够准确的定量描述目标图像的几何形状,从而能够对目标进行二、三维的有限元分析。本文 ImageJ 选用的是 64 位的最新版本 ImageJ 1.46r。

2.1. 序列图的导入与设定比例尺

ImageJ 软件可以识别很多种类型的图片,我们这里用到的是 X-CT 扫描海绵得到的 BMP 图像。BMP 是一种与硬件设备无关的图像文件格式,使用非常广泛。导入到 ImageJ 的图像序列必须按正确的顺序才能被软件识别。以 301 张 X-CT 图像为研究对象,这些图像可以通过 File→Import→Image Sequence 操作正确导入 ImageJ 软件中。图 1(a)为导入操作结果图,可以滑动按钮查看每张切片图。

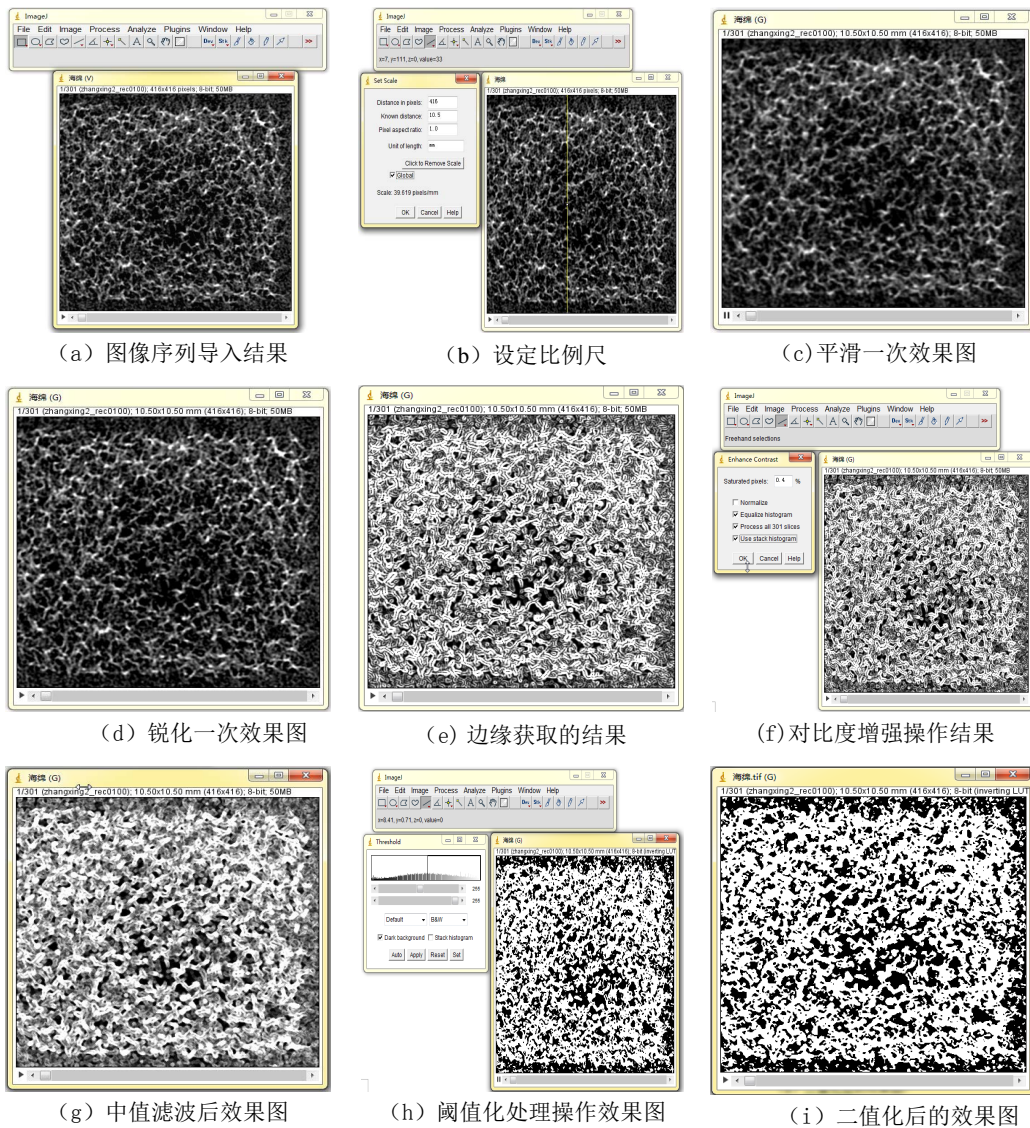


Figure 1. Two-dimensional image processing
图 1. 二维图像处理

标尺的设定是根据我们扫描物体的实际尺寸以及标记物的实际大小来确定。利用工具栏中的第五个工具的直线选项来设定比例尺。在序列图中选择一张图片，画一条线，此直线的长度根据扫描时的尺寸我们是已知的。具体操作为：Analyze→Set Scale，在新打开的窗口设置 Known distance 为标尺长度，Unit of length 设定单位为 mm，global 中打勾，可以使所有的图像序列均按此设定相同的比例尺，如图 1(b) 所示。设定比例尺的目的是为了进一步的图像处理，比如测量切片特定区域的面积，三维重建时切片间距的设定，三维立体图形的体积等。

2.2. 图像处理

一般的图像处理可以分为：图像的增强与复原(基本灰度增强、直方图均衡、空间滤波、空间域图像去噪、频率域滤波)；形态学图像处理(膨胀、腐蚀、边界提取、孔洞填充)；图像分割(阈值分割和区域分割)；分水岭图像分割。这里主要进行的是空域图像的处理、边界提取与阈值分割等[8]。

2.2.1. 平滑处理

平滑处理使图像增强技术中的基本处理方法之一，平滑处理主要用于去除加载在图像信号上的噪声分量，缺点是会使图像变得模糊起来。无论是图像的增强、恢复、分割、识别和理解，平滑都是这些处理前的预处理过程，目的就是要减少图像噪声对后续图像的影响。平滑处理与锐化处理我们均操作一次，这样效果会较好[9]。操作步骤 Process→Smooth，如图 1(c)所示。

2.2.2. 锐化处理

图像的锐化处理是为了提高图像的清晰度，锐化的方法有很多种，这里用的是空间滤波器方法，对原图在空间域进行处理。处理操作是 Process→Sharpen，每执行一次这样的操作，所选的图像将被锐化一次，如图 1(d)所示。

2.2.3. 边缘获取与对比度增强

边缘获取一般是通过找到图像中像素强度急剧变化的地方，把它作为目标边缘。ImageJ 软件使用的是 Sobel 算子进行边缘检测，包括水平和垂直两个方向算子。具体操作为 Process→Find Edges，结果如图 1(e)所示。

对比度增强实际上是增强原图的各部分的反差，操作中往往是通过增强原图里某两个灰度值之间的动态范围来实现的，主要包括两种方法：直方图拉伸，直方图均衡。操作为 Process→Enhance Contrast。对于本操作对象为图像序列，弹出的窗口如图 1(f)，对于窗口中的参数做几点说明。Saturated pixels：决定对比度增强的强度，设定的数值越大，对比度越强烈；Equalize histogram：软件对欲处理图像进行直方图均衡处理，以此来达到增强对比度；Use stack histogram：ImageJ 软件进行对比度增强时依据的是整个序列图像的直方图进行处理，而不是依据每张图像的直方图进行处理。对话框中的参数为如图 1(f)。

2.2.4. 图像降噪处理、阈值切割和二值化

图像中各种妨碍人们对其信息接受的因素即可称为图像噪声，理论上噪声是不可预测，只能用概率统计方法来认识随机误差。对于多孔介质 X-CT 图像中的噪声数据可以分为两类，一类是在孔隙空间中游离的一些小块的固体颗粒，这种数据在真实的多孔介质中是不存在的，另一类是在孔隙空间与固体骨架交界处，存在一些不规整的毛刺。去除这些不真实的噪音数据并使得交接面更加平滑的原因是，一个结构更加清晰的图像会使提取的孔隙网络模型更加有效。实验表明，使用中值滤波可以用来去除噪声，且使得图像的灰度分布区间化更加明显，有利于将图像区分为孔隙和固体骨架[5]。在 Process 菜单中单击 Noise 命令，在多种选项中我们选用 Despeckle 和 Remove Outliers。Despeckle 用来消除脉冲噪声(椒盐噪声)的中值滤波器，ImageJ 软件使用 3×3 的中值滤波器，使用 9 个像素灰度的中值代替中间像素值，有效地去除脉冲噪声，Remove Outliers 用来消去图像中的奇异点。结果如图 1(g)。

阈值切割是利用灰度直方图分析图像的灰度分布，通过对图像进行逐像素扫描并将像素标记为对象或背景，从而实现图像的切割。发现自适应阈值相较于固定阈值有着较好的特征提取效果。当使用固定阈值时，无法分割出图像中需要的信息，而使用自适应阈值，可以有效地分割出图像中的有用信息[10]。使用 Image→Adjust→Threshold 命令设置阈值。选择自动按钮，基于所选择图像的直方图选择阈值方法来自动设置阈值大小，即自适应阈值。结果如图 1(h)。

二值图像是指图像中颜色只有黑白两种，各点灰度值没有中间过渡的图像，所有的像素只能从 0 和 1 这两个值中取，一般用来描述文字或者图形，占用空间少。由于很多图像处理过程是建立在二值图像基础上，这里进行图像的二值化处理。在设置阈值的基础上进行二值化，打开 Process→Binary→Make Binary，用该命令来对图像序列进行二值化处理，如图 1(i)。

3. 三维可视化

3.1. 重建 3D 模型

ImageJ 软件将前面处理的 301 张 X-CT 图片通过前面图片在前后面图片在后的顺序依次累加层叠的方式实现三维重建。我们根据扫面时的切片之间的距离及设置的比例尺设定切片之间的距离，可以通过 ImageJ 软件的 3D 查看器来实现，可以非常直观的观察到的多孔介质三维立体图。在由图片重建成三维立体模型时必须注重重建过程中切片之间的距离，距离的设定关系到重建的优劣，需重点考虑。点击 Image→Properties，由之前设定的比例尺计算出了每个像素长为 0.0252404 mm，再由扫描时切片间的距离可以得出重建时距离为 0.039 mm，如图 2(a)。

多孔介质重建的具体操作步骤如下：1) 点击 Plugins→3D→3DViewer，弹出的对话框，可以对其单独操作，这里我们选用默认选项，如图 2(b)。2) 调整切片界面可以通过 View→Change background color 命令。可以调整背景颜色。滑动鼠标滚轮可放大缩小图像，将图像调整至适中大小。View 中的选项可以实现从不同视角来观察重建好的多孔介质模型。例如点击 View→start animation 即可得到多孔介质模型动态三维图，可以直观的看到各个剖面，如图 2(c)。

3.2. 三维立体图像切割

在三维重建多孔介质模型的基础上，可以从不同的方向对立体模型进行逐片切割来展示内部的结构和空隙。通过展示各个断面，可以验证重建的准确性，为定性、定量研究和分析多孔介质结构提供支持。

在 ImageJ 3D Viewer 窗口中实现切割功能。1) 使用命令 Edit→Display as→Orthoslice，如图 2(d)。三维图形被分成八个小块，可以清楚地看到分界面处的切片。2) 选中要切片的立体图形，使用 Edit→Adjust slice，在弹出的调整窗口中如图 2(e)所示，分别拖动 x、y、z 轴的滑块，可以即可看到在 x、y、z 方向上

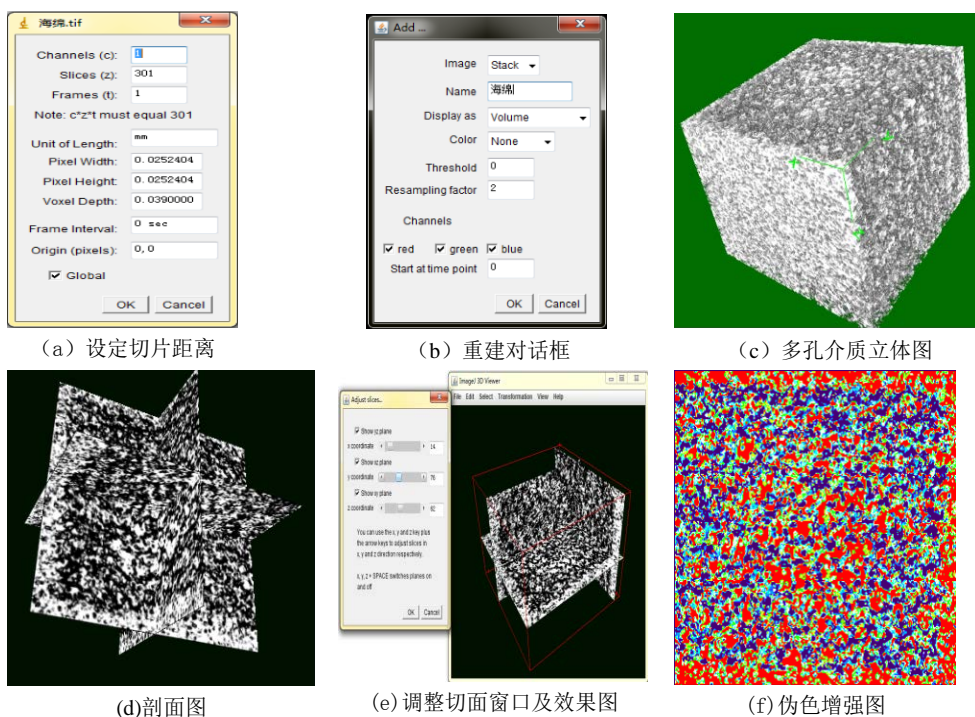


Figure 2. Three-dimensional visualization

图 2. 三维可视化

的切割图像。由于人眼对彩色分辨的能力远远大于对灰度的区分能力，我们将灰度图像变为彩色图像，从而使观察者能从图像中取得更多的信息。还可以在 Plugins→3D→Volume Viewer 中对三维多孔介质图像进行动态三维切割，并可对所得切割图伪色彩增强，如图 2(f)。

4. 讨论和结论

ImageJ 是国外生物医学等领域一款常用的数字图像处理软件，其具有强大的功能、良好的设计架构和可扩展性，在传热传质界利用此软件的文献甚少。尽管 ImageJ 已经有数百个操作和可视化插件，选择合适的插件来研究多孔介质重建是非常重要的，合适的插件往往可以事半功倍，需要进一步的探讨。本文对利用 ImageJ 软件对多孔介质 X-CT 图片三维重建进行了探讨，可以得到真实多孔介质的三维模型。这里给出了利用软件进行图片平滑、锐化、对比度增强、降噪、二值化以及构建三维模型、三维切割等三维重建的大体过程，希望能给科学研究领域中的三维重建提供有益的参考。三维重建是进一步研究三维立体多孔介质内流体流动与传热的基础，可以利用 ANSYS、COMSOL、LBM 等方法来研究微尺度的流动传热机理。

致 谢

感谢陈宝明、云和明两位老师的悉心指导。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 51076086)。

参考文献 (References)

- [1] Narsilio, G.A., Buzzi, O.P., Fityus, S.G., et al. (2009) Upscaling of Navier-Stokes equations in porous media: Theoretical, numerical and experimental approach. *Computers and Geotechnics*, **36**, 1200-1206.
- [2] Nuzzo, S., Peyrin, F., Martin, E., et al. (2001) Assessment of bone mineral content from 3-D synchrotron radiation microtomography images. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **48**, 859-863.
- [3] Lee, S.W., Kim, H.K., Cho, G., et al. (2002) A 3-D X-ray microtomographic system with a CMOS image sensor. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **48**, 1503-1505.
- [4] Sylvie, C., Marc, D. and Zlatko, D. (2002) Real-time flat-panel pixel imaging system and control for X-ray and neutron detection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **49**, 159-163.
- [5] 黄丰 (2008) 多孔介质模型的三维重构研究. 博士论文, 中国科学技术大学, 合肥.
- [6] 王波, 宁正福, 姬江 (2012) 多孔介质模型的三维重构方法. *西安石油大学学报 (自然科学版)*, **27**, 54-57, 61.
- [7] (2014) National Institutes of Health. <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>
- [8] 王亮 (2013) 基于数字图像处理技术的泥沙颗粒分析. 硕士论文, 重庆交通大学, 重庆.
- [9] 孙水法, 董方敏 (2013) ImageJ 图像处理与实践. 国防工业出版社, 北京.
- [10] 雷建锋, 汪伟 (2013) 基于 OpenCV 的图像阈值分割研究与实现. *现代电子技术*, **36**, 73-76.