

光学学报

基于 X 射线微焦 CT 的燃料颗粒空间距离自动测量方法

张小刚¹, 张理泽², 俞东宝¹, 许娟¹, 卢艳平^{2**}, 沈宽^{2*}

¹中核北方核燃料元件有限公司, 内蒙古 包头 014035;

²重庆大学工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044

摘要 在某燃料元件产品中燃料颗粒随机弥散分布在非金属材料中, 表征燃料颗粒的分布状况进而评估产品工艺质量具有重要意义。针对该问题, 对三维空间内相邻燃料颗粒的间距测量进行了研究, 使用 X 射线微焦计算机层析成像 (CT) 对该类产品进行了三维扫描成像, 从而得到了三维 CT 图像。在三维 CT 图像的基础上, 提出了一种结合改进型空间直觉模糊 C 均值聚类 and 三维区域生长的自动算法, 用于分割图像中的燃料颗粒以得到每个燃料颗粒的空间结构。然后, 通过计算质心获得燃料颗粒的中心坐标, 进而自动计算出相邻燃料颗粒的空间距离。通过仿真实验验证了所提算法的可行性, 通过标准球实验验证了测量误差, 并通过实际燃料元件测试了相邻燃料颗粒间距的自动测量, 表明了所提方法对燃料颗粒间距测量的有效性。

关键词 X 射线光学; 燃料颗粒; X 射线微焦计算机层析成像; 空间直觉模糊 C 均值聚类; 区域生长; 三维分割; 间距自动测量

中图分类号 TL99

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221566

1 引言

熔盐堆是第四代先进核能系统的堆型之一, 固态燃料熔盐堆采用基于三结构同向性型 (TRISO) 颗粒的燃料元件。在某型燃料元件产品中, TRISO 燃料颗粒弥散分布在棒状非金属碳化物材料中^[1], 燃料颗粒直径为 450~550 μm , 受工艺原因影响, 燃料颗粒在非金属材料中的分布往往是随机且非均匀的。燃料颗粒分布的均匀性状况将对该产品性能造成影响, 故准确测量这些燃料颗粒的空间距离对于定量分析和表征分布均匀性状况进而评价燃料元件产品工艺质量具有重要意义。

X 射线计算机层析成像 (CT) 技术是一种利用 X 射线透照物体并使用数学算法生成被检测物体内部结构图像的成像技术^[2]。该技术因其无接触、成像直观和精度高等优势迅速成为一种重要的无损检测手段, 被广泛应用于航空航天、汽车制造、金属加工和材料表征等领域中^[3-4]。X 射线微焦 CT 是一种分辨能力可达到微米级的精密 CT 检测方法, 它可以无损伤地获取被测物体内外部的三维结构状况, 因其出色的几何细节分辨能力被越来越广泛地应用于小尺寸工件的高精度检测分析^[5]。因燃料颗粒直径约为 0.5 mm, 一般球

间距大于 1 mm, 故采用微米级分辨率的微焦 CT 对燃料元件进行检测。

目前针对不同工件的间距测量方法较多。杨蕴杰等^[6]提出了一种基于三维点云模型的圆孔特征提取和圆心计算方法, 并通过最大距离分布识别圆心进行测量。马晓丽等^[7]针对透射电镜图像的晶面间距测量问题, 建立了一种间距测量系统, 解析和拓展了图像处理与分析软件功能, 提高了测试分析效率和分析精度。王春雷等^[8]利用单目立体测量技术提出了一种用于校正雷电冲击电流实验装置放电铜球间距的方法, 通过对上下铜球表面进行亚像素提取和分割实现了铜球距离的测量和标定。Huang 等^[9]针对具有平面特征的大尺寸工件, 提出了一种新的基于双目视觉结合动态局部平面的孔半径和间距测量方法, 与常见方法相比, 测量精度在半径和间距上都得到了提升。Güçlü 等^[10]利用 Mask R-CNN 对铁路轨枕间距进行了研究以确保铁路轨道系统安全。以上方法主要针对二维图像进行间距测量, 在空间测量中的方法较少, 且仅能对外部工件进行测量, 无法有效对工件内部结构进行分析。

此外, 目前关于燃料元件中燃料颗粒间距的测量方法也鲜见报道。针对空间相邻燃料颗粒间距的测量问题, 本文通过 X 射线微焦 CT 扫描获得燃料元件三

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2022-10-22; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2022-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (52075057)

通信作者: *iamsk@163.com; **luy_p_cqu@126.com

维图像数据,采用改进型空间直觉模糊 C 均值聚类方法从三维 CT 图像的二维切片序列图像中分割得到包含所有燃料颗粒的二值化图像组,并在此基础上使用三维区域生长算法完成对每个燃料颗粒空间结构的自动分割。在三维区域生长得到燃料颗粒结构的基础上对其质心进行计算,并求出其最近燃料颗粒的质心坐标和空间距离。

2 三维分割

2.1 图像预处理

原始三维 CT 图像通常存在噪声较大、目标-背景对比度较差等问题,因此需对图像进行预处理。窗宽/窗位调节是 CT 图像中一种常见的对比度增强方法,其中窗宽表示图像中可显示的灰度范围,窗位表示灰度范围的中心,对图像进行窗宽/窗位调节可使图像灰度分布更加均匀,从而有利于显示图像中的细节^[11]。图像窗宽/窗位调节公式为

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j), & f(i, j) < G_{\text{low}} \text{ and } f(i, j) > G_{\text{up}} \\ \frac{255}{G_{\text{up}} - G_{\text{low}}} \cdot f(i, j), & G_{\text{low}} \leq f(i, j) \leq G_{\text{up}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $f(i, j)$ 和 $g(i, j)$ 分别为调节前后的图像; G_{up} 和 G_{low} 分别为调节灰度的上下限。

针对图像中存在噪声和边缘不突出的特点,采用引导滤波方法进行处理,其在过滤噪声的同时能保留燃料颗粒边缘信息。各向同性滤波器对待噪声和边缘信息采用一致的策略,导致在抑制噪声的同时图像中的细节和边缘也被平滑。引导滤波器在特定情况下是一种保边滤波器,可以在保留边缘信息的同时减少细节和纹理损失。引导滤波器的定义^[12-13]为

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I) p_j, \quad (2)$$

式中: p_j 和 q_i 为输入图像和输出图像; $W_{ij}(I)$ 为根据引导图像 I 确定的权重值。当引导图像 I 与输入图像 p_j 一致时,引导滤波器就可转换为保边滤波器。

2.2 改进型空间直觉模糊 C 均值聚类

模糊 C 均值聚类算法^[14](FCM)被广泛应用于图像处理和数据分析领域。在非模糊聚类中数据被划分至不同簇,并且每个数据只能属于一个簇,但可通过在模糊聚类中引入隶属度的方法使得每个数据可以隶属于多个簇。该算法原理为利用数据 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 与聚类中心 v_j 间的距离,通过迭代最小化目标函数将数据划分为 C 类,算法收敛时即可根据各个数据对各聚类中心的隶属度完成模糊聚类划分。空间直觉 FCM^[15](SIFCM)是在 FCM 算法基础上通过引入直觉模糊集^[16]和空间信息得到的。SIFCM 算法在引入直觉隶属度后,在原有描述样本的隶属度和非隶属度的基础上增加了犹豫度以更好地描述问题中

的不确定性和未知性。此外,通过空间信息避免了 FCM 算法中仅考虑单个数据易受噪声影响而导致误分类的问题,故 SIFCM 算法相较于 FCM 算法可以获得更好的聚类效果^[17]。

在有噪声图像中可通过空间函数充分考虑邻域像素间的关系,减少误分类像素数量,以及提高图像分割的精度和速度。针对传统 SIFCM 算法中空间函数采用等值权重掩膜导致的空间信息利用不足的问题,受非局部思想启发,本文将该思想引入到聚类隶属度计算中得到了改进型 SIFCM(NL-SIFCM)算法。非局部思想认为全局信息中每个点间都存在相似性,可利用全局信息搜索相似性深入挖掘冗余信息。在本文中对空间函数进行改进,使用隶属度的非局部空间信息作为空间函数,充分利用图像中的冗余信息。图像降噪和超分辨率重建中均利用这种思想来提高图像质量^[18]。NL-SIFCM 算法的总体流程如下。

1) 初始化隶属度矩阵 u 、聚类中心 v 和模糊聚类参数。

2) 更新隶属度的公式为

$$u_{ji} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|_2}{\|x_i - v_k\|_2} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (3)$$

式中: u_{ji} 为 x_i 对第 j 类聚类的隶属度; v_j 为第 j 类聚类中心; m 为模糊权重参数,通常设置为 2。

3) 使用 Sugeno 型构造方法生成非隶属度 $v(x)$ 并计算得到犹豫度 D ,并利用犹豫度和隶属度得到直觉隶属度 u'_{ji} ,非隶属度 $v(x)$ 和直觉隶属度 u'_{ji} 为

$$v(x) = \frac{1 - u(x)}{1 + \lambda u(x)}, \quad \lambda > 0, \quad (4)$$

$$u'_{ji}(x) = u_{ji}(x) + D_{ji}(x) = u_{ji}(x) + 1 - u_{ji}(x) - v_{ji}(x) = \frac{(1 + \lambda)u_{ji}}{1 + \lambda u_{ji}}. \quad (5)$$

4) 利用非局部信息得到隶属度的非局部信息,再计算得到空间直觉隶属度 u''_{ji} ,非局部信息和空间直觉隶属度的计算公式为

$$h_{ji} = \sum_{z \in W_i^p} w(i, z) \cdot u_{jz}, \quad (6)$$

$$w(i, z) = \frac{1}{Z(i)} \exp\left(-\frac{\|u_{ji} - u_{jz}\|_2^2}{h^2}\right), \quad (7)$$

$$u''_{ji} = \frac{u_{ji}^p h_{ji}^q}{\sum_{k=1}^c u_{ki}^p h_{ki}^q}, \quad (8)$$

式中: $w(i, z)$ 为 u_{ji} 与 u_{jz} 间的权重,权重大小取决于两者间的相似度; p 和 q 分别为空间信息的相对权重; $Z(i)$ 为归一化系数。

5) 更新聚类中心的公式为

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ji}^{(m)} x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ji}^{(m)}}. \quad (9)$$

6) 判断两次迭代间隶属度矩阵 U 的最大差值是否小于终止阈值 ϵ 即 $\max[u^{(t+1)} - u^{(t)}] < \epsilon$ 或超出最大迭代次数, 否则继续重复步骤 2)。

7) 在停止迭代后, 根据隶属度矩阵判断每个像素在类别中的最大隶属度值, 并将该像素设置为对应类。

此外, 考虑到本文研究对象为三维 CT 图像, 其是

由成百上千张二维切片图像组成的, 如图 1 所示。相邻切片间存在空间相似性即相邻切片的空间结构基本保持不变。因此, 将上层切片迭代结束后的隶属度矩阵作为下层切片迭代的起始隶属度矩阵。经过该改进后, 隶属度只需要经过少量迭代后便可快速达到收敛, 减少算法运行时间可提高算法运行效率, 故提出了快速 NL-SIFCM 算法。

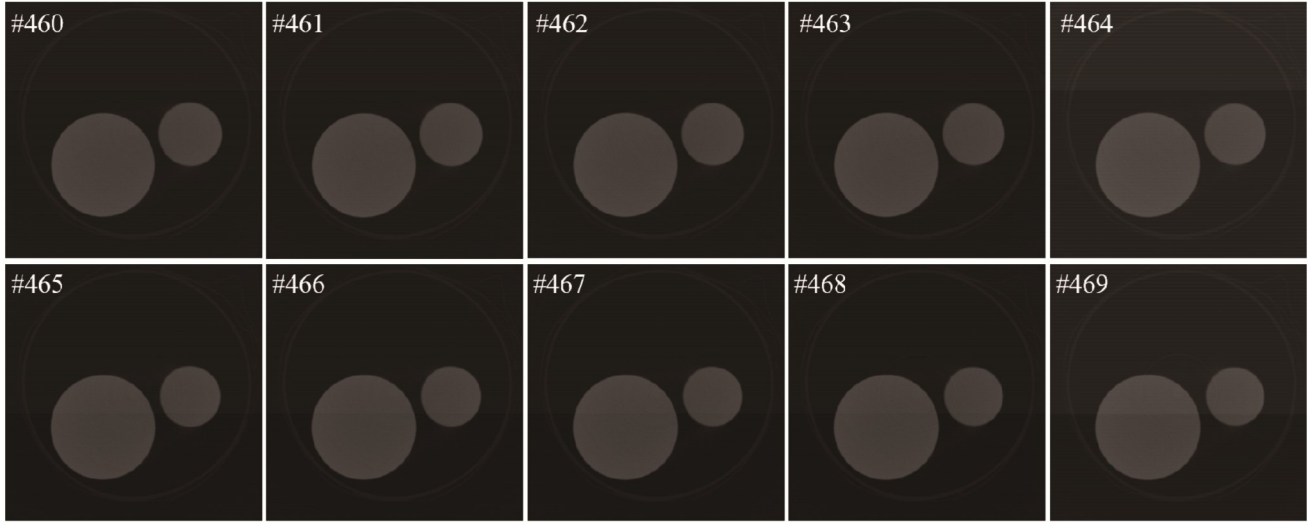


图 1 连续切片图像
Fig. 1 Serial slice images

2.3 三维区域生长

通过快速 NL-SIFCM 分割得到燃料颗粒二值化图像组后, 无法得到单个燃料颗粒的空间结构, 因此需要在二值化图像组的不同切片中对同属一个燃料颗粒的体素进行搜索标记。区域生长算法是数字图像处理中一种广泛使用的图像分割和搜索方法^[19]。

在传统区域生长中, 选择具有相似特征的像素并入区域中, 当搜索区域中没有可合并像素时停止生长, 形成连通分量。区域生长算法根据搜索区域不同可以分为二维区域生长和三维区域生长, 如图 2 所示。二维区域生长中搜索区域局限为二维平面中当前像素的 4 邻域或 8 邻域, 而三维区域生长将搜索区域从二维平面拓展为三维空间中当前像素的 26 邻域。

一个完整的区域生长算法由三部分组成, 即种子点、生长准则和终止条件。区域生长算法中第一步就是选取种子点, 种子点选取直接决定了区域生长效果。在传统区域生长算法中选取种子点通常需要由人工交互指定, 为了实现自动测量, 必须采用自动种子点选取。因此, 在种子点选取中引入图像矩。图像矩是指图像中某些特定像素灰度值的加权平均值, 可通过图像矩获得图像面积、质心和方向等信息, 其中第 $i + j$ 阶图像矩^[20]可表示为

$$m_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y), \quad (10)$$

式中: $I(x, y)$ 为图像中 (x, y) 处的灰度值。图像一阶

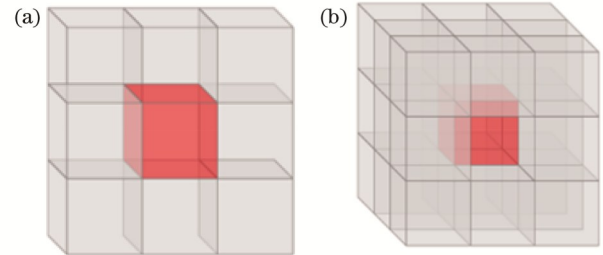


图 2 二维和三维数据中体素的邻域。(a) 8 邻域示意图; (b) 26 邻域示意图

Fig. 2 Neighborhoods of voxels in two-dimensional and three-dimensional data. (a) 8-neighborhood diagram; (b) 26-neighborhood diagram

矩在物理意义上表示图像目标区域的质心。本文采用质心作为种子点, 通过检测二值化图像中的轮廓即可得到燃料颗粒的边缘, 随后利用燃料颗粒边缘计算一阶矩进而求得质心。使用边缘检测生成质心作为种子点可有效避免遗漏图像中的燃料颗粒, 其中质心 (\bar{x}, \bar{y}) 可由一阶矩推导为

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right). \quad (11)$$

生长准则可定为检查当前种子点 26 邻域内的像素灰度值, 若灰度为 255 且该点未被生长过, 则将该点加入当前区域中, 并将该邻域点坐标压入生长队列中。不断从队首取出坐标并检查其邻域像素从而完成区域

生长。在生长过程中要检查 26 邻域坐标是否会超出图像和图像组范围,若超出,则跳过该点。

同样终止条件也不复杂,当生长队列中已没有任何坐标时即可认为本次区域生长完成,得到缺陷标记。然后,从下一种子点开始继续根据生长准则和终止条件得到缺陷标记。依次遍历图像组中每一张切片即可得到全部燃料颗粒的空间结构标记。三维区域生长算法流程图如图 3 所示。

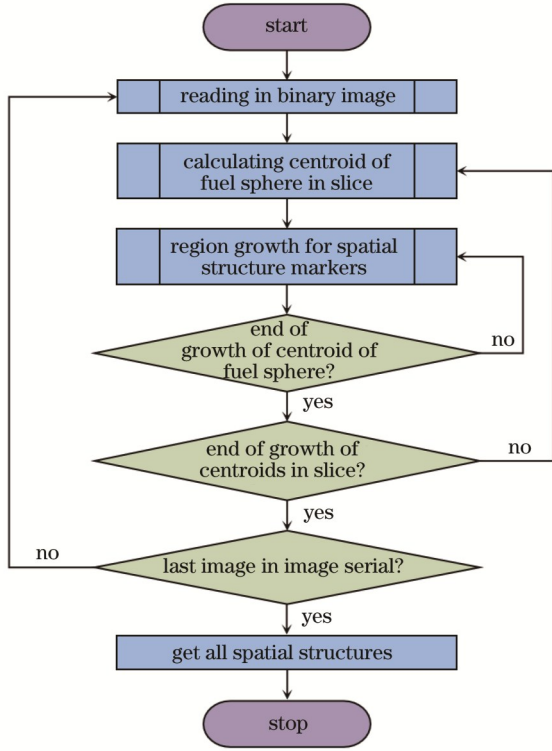


图 3 三维区域生长算法流程图

Fig. 3 Flowchart of 3D region growing algorithm

3 质心与间距计算

3.1 质心计算

在得到三维区域生长标记的图像组后即可得到每个燃料颗粒的空间结构,包括燃料颗粒中空间结构中每个点的坐标值,通过坐标值即可计算燃料颗粒的质心。质心指物质系统上被认为质量集中于此处的一个假想点^[21]。质心计算公式为

$$r_o = \frac{\sum_i m_i r_i}{M}, \quad (12)$$

式中: m 为系统内单点的质量; r 为各个点相对于某一坐标原点的距离; M 为系统的总体质量。在图形学中重力场可被视为是均匀的,故质心计算公式可简化为

$$r_o = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^n x_i, \sum_{i=0}^n y_i, \sum_{i=0}^n z_i \right), \quad (13)$$

式中: (x, y, z) 为隶属于该物体所有点的坐标。

根据质心计算公式遍历图像组,根据通过三维区

域生长得到的不同灰度值区分不同燃料颗粒,并计算图像组中所有燃料颗粒的质心。

3.2 质心空间距离计算

在实际需求中,燃料颗粒质心的空间距离可直观表达燃料颗粒的间距。在已知燃料颗粒的质心坐标信息后,利用欧氏距离公式计算两两燃料颗粒质心的空间距离,即

$$D(p_i, p_j) = \sqrt{(x_{p_i} - x_{p_j})^2 + (y_{p_i} - y_{p_j})^2 + (z_{p_i} - z_{p_j})^2}, \quad (14)$$

式中: $D(p_i, p_j)$ 表示质心点 p_i 与 p_j 的空间距离; (x_p, y_p, z_p) 为质心 p 的坐标。

在进行质心空间距离计算时,每次以一个燃料颗粒为基准,遍历剩余燃料颗粒的质心,并利用式(14)计算两燃料颗粒的空间距离。然后,比较空间距离,得到与当前基准燃料颗粒最近的质心,并保存对应燃料颗粒的编号和空间距离。最近质心空间距离的计算过程如图 4 所示。

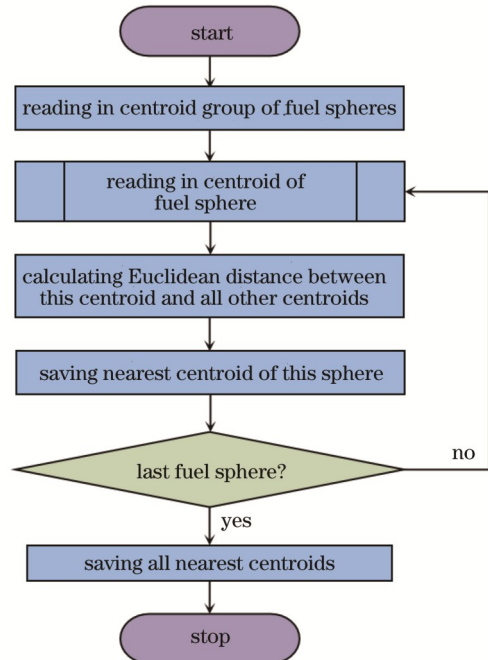


图 4 最近质心计算流程图

Fig. 4 Flowchart of nearest centroid calculation

4 实验研究

4.1 仿真实验

为了验证算法的可行性,先建立大小为 1000 pixel×1000 pixel×1000 pixel 的体素燃料颗粒模型,20 个燃料颗粒的空间分布图如图 5 所示。其中,黑色表示半径为 30 pixel 的球体、灰色表示半径为 25 pixel 的球体,球体位置在空间中随机分布。球体坐标参数如表 1 所示。

最近质心测量结果如表 2 所示。在测量结果表

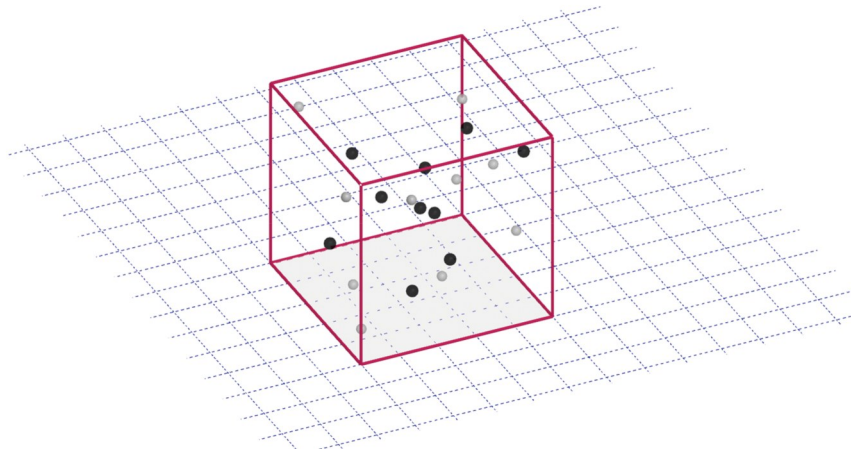


图 5 模拟燃料颗粒空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of simulated fuel particles

表 1 模拟燃料颗粒坐标参数

Table 1 Coordinate parameters of simulated fuel particles

Particle No.	Coordinate of X-axis / pixel	Coordinate of Y-axis / pixel	Coordinate of Z-axis / pixel	Radius / pixel
1	500	500	500	25
2	200	300	400	25
3	100	100	900	25
4	900	470	310	25
5	150	900	300	25
6	955	832	498	25
7	912	732	870	25
8	653	123	216	25
9	456	785	961	25
10	900	49	128	25
11	678	259	681	30
12	239	694	480	30
13	168	231	142	30
14	912	891	899	30
15	489	794	815	30
16	123	798	135	30
17	889	320	261	30
18	418	584	386	30
19	679	617	239	30
20	412	231	781	30

中,每个球体质心坐标与设定模拟燃料颗粒的坐标参数一一对应,通过仿真实验完成了对图像组中每个燃料颗粒的质心求解。在得到图像中所有质心后,根据两两质心的欧氏距离即可得到每个质心点对应的最近质心点。表 2 详细展示了最近质心计算结果和球心距。随后,本文对运行时间进行了测量,在大小为 1000 pixel×1000 pixel×1000 pixel 图像中测量 20 个球体的时间为 0.75788 s,求解速度较快,在实际工程应用中是可接受的。

4.2 测量实验

为了进一步验证所提方法的可行性与准确性,选取 2 个直径 5000 μm 和 4 个直径 2000 μm 的氮化硅材料标准球体模拟空间燃料颗粒进行测量误差验证。使用重庆真测科技股份有限公司生产的 CD-300BX/μCT-B 微焦三维 CT 分析仪器对标准球体进行锥束扫描重建,重建图像是尺寸为 1484 pixel×1484 pixel×1424 pixel 的体素,体素边长为 8.004 μm。由于标准球体空间分布的距离为毫米级而图像分辨率为微米

表 2 最近质心测量结果
Table 2 Measurement results of nearest centroids

Particle No.	Coordinate	Nearest particle No.	Coordinate of nearest particle	Distance of centroids /pixel
1	(500 pixel, 500 pixel, 500 pixel)	17	(889 pixel, 320 pixel, 261 pixel)	490.75
2	(200 pixel, 300 pixel, 400 pixel)	13	(168 pixel, 231 pixel, 142 pixel)	268.98
3	(100 pixel, 100 pixel, 900 pixel)	20	(412 pixel, 231 pixel, 781 pixel)	358.70
4	(900 pixel, 470 pixel, 310 pixel)	17	(889 pixel, 320 pixel, 261 pixel)	158.18
5	(150 pixel, 900 pixel, 300 pixel)	16	(123 pixel, 798 pixel, 135 pixel)	195.85
6	(955 pixel, 832 pixel, 498 pixel)	7	(912 pixel, 732 pixel, 870 pixel)	387.60
7	(912 pixel, 732 pixel, 870 pixel)	14	(912 pixel, 891 pixel, 899 pixel)	161.62
8	(653 pixel, 123 pixel, 216 pixel)	10	(900 pixel, 49 pixel, 128 pixel)	272.45
9	(456 pixel, 785 pixel, 961 pixel)	15	(489 pixel, 794 pixel, 815 pixel)	149.95
10	(900 pixel, 49 pixel, 128 pixel)	8	(653 pixel, 123 pixel, 216 pixel)	272.45
11	(678 pixel, 259 pixel, 681 pixel)	20	(412 pixel, 231 pixel, 781 pixel)	285.55
12	(239 pixel, 694 pixel, 480 pixel)	18	(418 pixel, 584 pixel, 386 pixel)	230.17
13	(168 pixel, 231 pixel, 142 pixel)	2	(200 pixel, 300 pixel, 400 pixel)	268.98
14	(912 pixel, 891 pixel, 899 pixel)	7	(912 pixel, 732 pixel, 870 pixel)	161.62
15	(489 pixel, 794 pixel, 815 pixel)	9	(456 pixel, 785 pixel, 961 pixel)	826.71
16	(123 pixel, 798 pixel, 135 pixel)	5	(150 pixel, 900 pixel, 300 pixel)	195.85
17	(889 pixel, 320 pixel, 261 pixel)	4	(900 pixel, 470 pixel, 310 pixel)	158.18
18	(418 pixel, 584 pixel, 386 pixel)	1	(500 pixel, 500 pixel, 500 pixel)	163.63
19	(679 pixel, 617 pixel, 239 pixel)	4	(900 pixel, 470 pixel, 310 pixel)	274.76
20	(412 pixel, 231 pixel, 781 pixel)	11	(678 pixel, 259 pixel, 681 pixel)	285.55

级,故该体素分辨率可满足测量精度要求,重建图如图 6 所示。

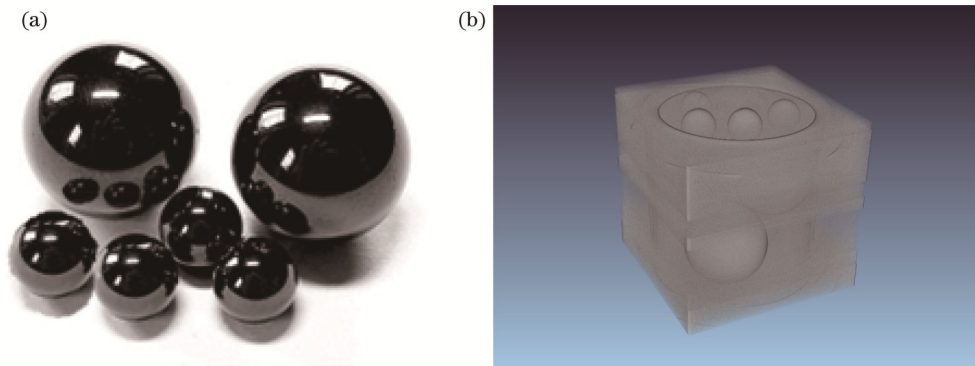


图 6 标准球及其三维 CT 图像。(a)标准球;(b)三维 CT 图像
Fig. 6 Standard balls and three-dimensional CT image. (a) Standard balls; (b) three-dimensional CT image

标准球三维图像经过窗宽/窗位调节和引导滤波增强后,球体轮廓清晰、球体与背景对比度提升,如图 7 所示,该点也可从对应的三维灰度分布图中得到印证。随后,采用 NL-SIFCM 和三维区域增长算法对目标球体进行三维分割,避免了过分割和欠分割,得到的分割后的标准球图像如图 8 所示。最后,计算了目标球体的质心坐标值,并对相邻球体间距进行了计算,如表 3 所示。由于标准球是规则圆球体,故求解质心后计算出的球体直径可以准确表征所提方法的测量误差。可以看出,最大测量误差为 7 μm 。

4.3 燃料颗粒实验

为了验证所提方法对实际燃料元件中燃料颗粒间距测量的有效性,对某型燃料元件样品采用 CD-300BX/ μCT -B 微焦三维 CT 分析仪器进行锥束 CT 扫描重建,体素尺寸约为 10.89 μm ,重建的三维 CT 图像和燃料颗粒分布图像如图 9(a)和图 9(b)所示。由于颗粒间距测量方法对于空间内任意颗粒都是适用的,故任意选取图 9(b)中的 5 颗燃料颗粒并对其进行测量,如图 9(c)所示。

最后,计算了图 9(c)中目标燃料颗粒的质心坐标

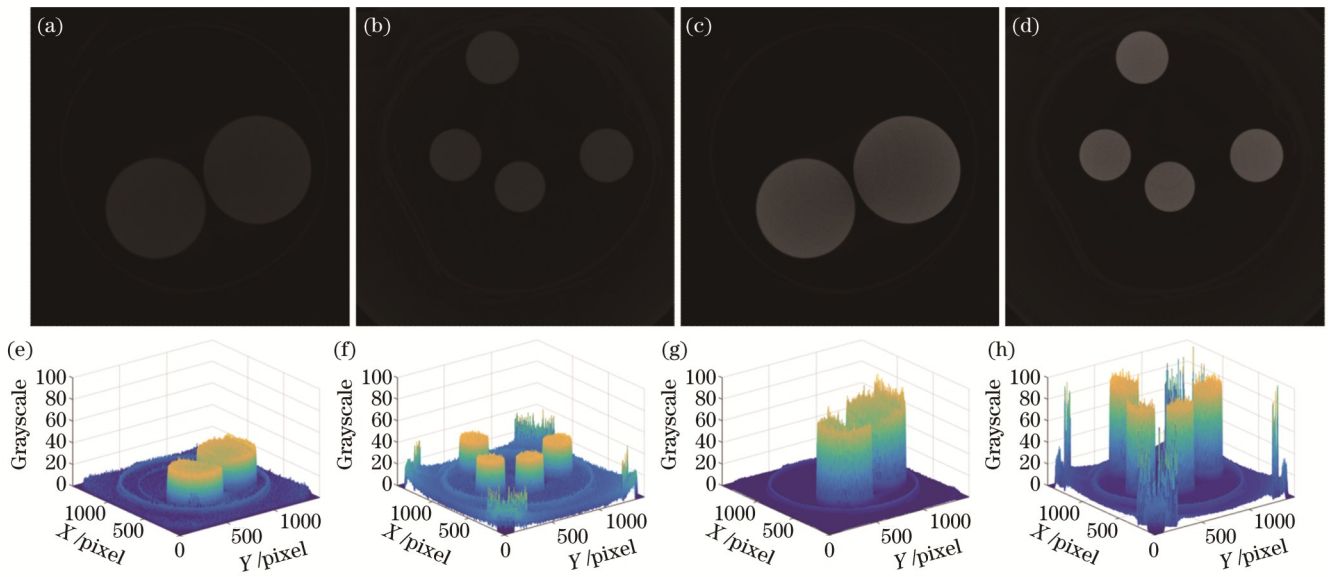


图 7 图像预处理对比图。(a)(b)原始切片;(c)(d)预处理后的切片;(e)~(h)三维灰度分布图

Fig. 7 Comparison chart of image preprocessing. (a)(b) Original slice images; (c)(d) slice images after preprocessing; (e)-(h) three-dimensional grayscale distribution maps

表 3 标准球测量结果

Table 3 Measurement results of standard balls

Ball No.	Nominal value of ball diameter / μm	Measured value of ball diameter / μm	Coordinate of centroid	Nearest ball No.	Centroid coordinate of nearest ball	Distance of centroids / μm
1	2000	1998	(634 pixel, 234 pixel, 260 pixel)	2	(460 pixel, 688 pixel, 212 pixel)	3835.2
2	2000	1999	(460 pixel, 688 pixel, 212 pixel)	3	(762 pixel, 834 pixel, 200 pixel)	2685.2
3	2000	1996	(762 pixel, 834 pixel, 200 pixel)	2	(460 pixel, 688 pixel, 212 pixel)	2685.2
4	2000	1996	(1166 pixel, 690 pixel, 242 pixel)	3	(762 pixel, 834 pixel, 200 pixel)	3447.6
5	5000	4994	(1052 pixel, 756 pixel, 686 pixel)	4	(1166 pixel, 690 pixel, 242 pixel)	3705.0
6	5000	4993	(580 pixel, 936 pixel, 1082 pixel)	5	(1052 pixel, 756 pixel, 686 pixel)	5135.0

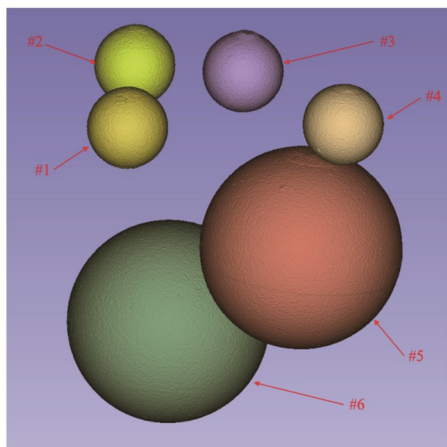


图 8 标准球分割图

Fig. 8 Segmentation image of standard balls

值,并对相邻球体间距进行了计算,获得了燃料颗粒的空间距离测量值,如表 4 所示。

5 结 论

通过 X 射线微焦 CT 对燃料元件中燃料颗粒进行检测和分析,提出了一种基于改进型 SIFCM 和三维区域生长的自动算法完成了 X 射线微焦 CT 三维图像空间中独立燃料颗粒的三维分割。为验证所提算法的可行性和准确性,对模拟燃料颗粒、标准球体和燃料元件样品进行了测量实验。在得到球结构的基础上,完成了对质心的计算和最近质心的搜索并得到了相邻球间距,验证了所提方法的适用性,为开展燃料颗粒在非金属材料中的分布均匀性状况定量表征打下了基础。

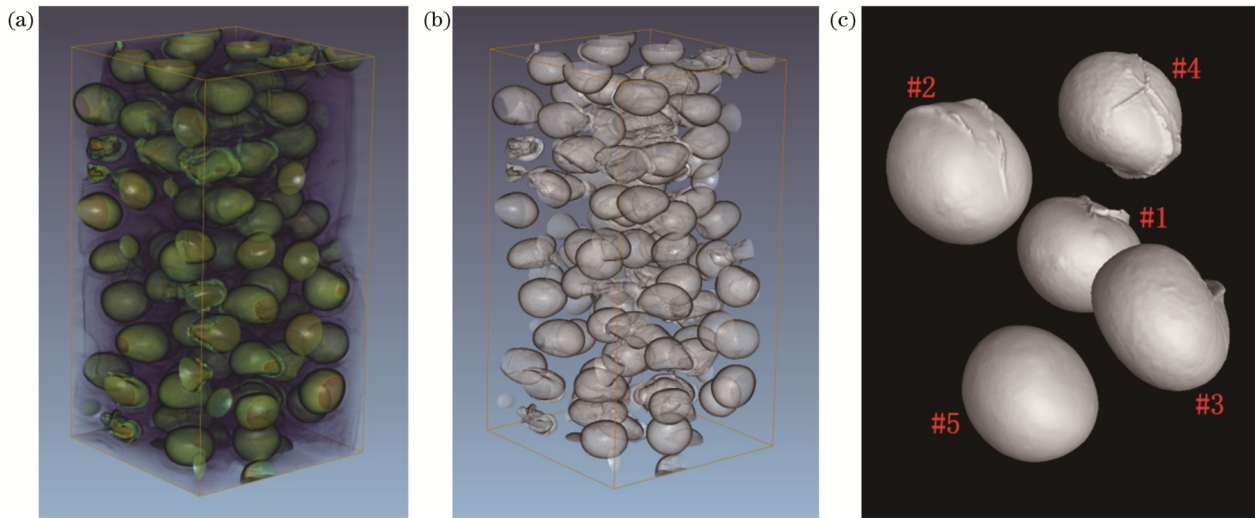


图 9 燃料元件样品三维 CT 图。(a)样品三维 CT 图像;(b)燃料颗粒分布;(c)分割的局部燃料颗粒

Fig. 9 Three-dimensional CT image of fuel element sample. (a) Three-dimensional CT image of sample, (b) distribution of fuel particles; (c) segmented local fuel particles

表 4 燃料颗粒测量结果

Table 4 Measurement results of fuel particles

Particle No.	Coordinate of centroid	Nearest particle No.	Centroid coordinate of nearest particle	Distance of centroids / pixel	Spatial distance of particles / μm
1	(476 pixel, 193 pixel, 210 pixel)	4	(465 pixel, 170 pixel, 299 pixel)	92.58	1008.2
2	(565 pixel, 110 pixel, 259 pixel)	4	(465 pixel, 170 pixel, 299 pixel)	123.29	1342.6
3	(595 pixel, 248 pixel, 269 pixel)	5	(606 pixel, 210 pixel, 184 pixel)	93.75	1021.0
4	(465 pixel, 170 pixel, 299 pixel)	1	(476 pixel, 193 pixel, 210 pixel)	92.58	1008.2
5	(606 pixel, 210 pixel, 184 pixel)	3	(595 pixel, 248 pixel, 269 pixel)	93.75	1021.0

参 考 文 献

[1] 郭曼珊. 基于 X 射线相位衬度成像的 TRISO 燃料颗粒无损分析[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2019: 25-33.
Guo M S. Nondestructive analysis of TRISO fuel particles based on X-ray phase contrast imaging modalities[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 25-33.

[2] Carmignato S, Dewulf W, Leach R. Industrial X-ray computed tomography[M]. Cham: Springer, 2018.

[3] Villarraga-Gómez H, Herazo E L, Smith S T. X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology[J]. Precision Engineering, 2019, 60: 544-569.

[4] Hsieh J, Flohr T. Computed tomography recent history and future perspectives[J]. Journal of Medical Imaging, 2021, 8(5): 052109.

[5] 杨安坤. 微纳 CT 系统扫描方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 8-19.
Yang A K. Research on scanning method of nano-CT system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 8-19.

[6] 杨蕴杰, 方宇, 杨皓, 等. 基于三维点云的栅极间距测量方法[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 404-410.
Yang Y J, Fang Y, Yang H, et al. Grid gap measurement method based on three-dimensional point cloud[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(11): 404-410.

[7] 马晓丽, 刘礼. 透射电镜图像处理的晶面间距测量系统设计[J]. 电子显微学报, 2022, 41(2): 123-127.
Ma X L, Liu L. Design of interplanar spacing measurement

system based on image processing of TEM[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2022, 41(2): 123-127.

[8] 王春雷, 严俊, 黄正宇, 等. 基于单目立体测量技术的放电铜球间距校准方法[J]. 环境技术, 2017, 35(6): 59-62, 66.
Wang C L, Yan J, Huang Z Y, et al. The calibration method of the distance of discharging copper balls based on single-camera stereovision technology[J]. Environmental Technology, 2017, 35(6): 59-62, 66.

[9] Huang J H, Qi M W, Wang Z, et al. High precision measurement for the chamfered hole radius and spacing of a large -size workpiece based on binocular vision combined with plane dynamic adjustment[J]. Applied Optics, 2021, 60(29): 9232-9240.

[10] Güçlü E, Aydın İ, Akın E. Measurement of railway sleepers spacing using mask R-CNN[C]//2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA), March 23-25, 2022, Chiangrai, Thailand. New York: IEEE Press, 2022: 1416-1420.

[11] 陈嘉威, 沈宽. 低密度粉末材料的 DR 图像夹杂检测[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1110002.
Chen J W, Shen K. Inclusion detection from DR images of low-density powder materials[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1110002.

[12] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.

[13] He K M, Sun J. Fast guided filter[EB/OL]. (2015-04-05)[2022-05-06]. <https://arxiv.org/abs/1505.00996>.

- [14] Suganya R, Shanthi R. Fuzzy c-means algorithm-a review[J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2012, 2(11): 1-3.
- [15] Tripathy B K, Basu A, Govel S. Image segmentation using spatial intuitionistic fuzzy C means clustering[C]//2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, December 18-20, 2014, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2014.
- [16] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [17] Xu Z S, Wu J J. Intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithms[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(4): 580-590.
- [18] Buades A, Coll B, Morel J M. Non-local means denoising[J]. Image Processing on Line, 2011, 1: 208-212.
- [19] Shrivastava N, Bharti J. Automatic seeded region growing image segmentation for medical image segmentation: a brief review[J]. International Journal of Image and Graphics, 2020, 20(3): 2050018.
- [20] 代双凤, 吕科, 翟锐, 等. 基于 3D 区域增长法和改进的凸包算法相结合的全肺分割方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2358-2364.
- [21] 王星星, 唐新明, 祝小勇, 等. 高分七号卫星足印光斑质心提取方法与稳定性监测[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2428001.
- Dai S F, Lü K, Zhai R, et al. Lung segmentation method based on 3D region growing method and improved convex hull algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(9): 2358-2364.
- Wang X X, Tang X M, Zhu X Y, et al. Centroid extraction method of Gaofen-7 satellite footprint spots and stability monitoring[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2428001.

Automatic Spatial Distance Measurement Method for Fuel Particles Based on X-Ray Micro-CT

Zhang Xiaogang¹, Zhang Lize², Yu Dongbao¹, Xu Juan¹, Lu Yanping^{2*}, Shen Kuan^{2*}

¹China North Nuclear Fuel Co. Ltd., Baotou 014035, Inner Mongolia, China;

²Industrial CT Non-destructive Testing Engineering Research Center of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract

Objective The molten salt reactor is a type of reactor of the fourth-generation advanced nuclear power systems. Solid fuel molten salt reactor uses fuel elements based on tristructural isotropic (TRISO) particles. In a type of fuel element product, TRISO particles are dispersed in the rod carbide material. Due to process reasons, the distribution of fuel particles in the matrix material is often random and non-uniform. However, distribution uniformity affects the performance of the product. Therefore, accurately measuring the spacing between these fuel particles is of great significance for the quantitative analysis and characterization of distribution uniformity and the further process quality evaluation of fuel element products. At present, many spacing measurement methods are available for different workpieces. Nevertheless, measurement methods for the three-dimensional (3D) space are limited, and the internal structure of workpieces cannot be effectively analyzed. In addition, the measurement of spacing between fuel particles in fuel elements is rarely reported.

Methods This paper investigates an automatic measurement method for the spacing between adjacent fuel particles in the 3D space. Specifically, X-ray micro-computed tomography (micro-CT) is applied to obtain 3D CT images of fuel element products. Then, the 3D CT images are preprocessed in a manner of enhancement by window width/window level adjustment and guided filtering, and an improved spatial intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm, namely, nonlocal spatial intuitionistic fuzzy C-means (NL-SIFCM), is proposed. To solve the problem of insufficient spatial information utilization caused by the use of the equivalent weight mask for spatial functions in traditional SIFCM algorithms, this paper also brings the non-local idea into cluster membership calculation. The relationship between neighboring pixels in noisy images is fully considered by spatial functions to reduce the number of misclassified pixels and improve the accuracy and speed of image segmentation. On this basis, the 3D region growing algorithm is used to segment the fuel particles in the image and thereby obtain the spatial structure of each fuel particle. Finally, the centroid coordinates of the fuel particles are obtained, and the Euclidean distance between adjacent fuel particles is automatically calculated.

Results and Discussions To verify the feasibility of the algorithm, this paper builds a random distribution model of fuel particles (Fig. 5). By simulation experiments, the centroid of each fuel particle in the model is obtained, and the nearest centroid and its distance from the current centroid are calculated (Table 2). Running time is measured as well, and the calculation time of 20 spheres is 0.75788 s, indicating that the solution speed is fast and acceptable in practical engineering applications. To further verify the feasibility and accuracy of the proposed method, this paper selects standard spheres of silicon nitride (Fig. 6) to simulate spatial fuel particles. The 3D images of the standard spheres are preprocessed in a

manner of enhancement by window width/window level adjustment and guided filtering (Fig. 8). Then, the NL-SIFCM algorithm and the 3D region growing algorithm are employed for the 3D segmentation of the target spheres. Finally, the centroid coordinates of the target spheres are obtained, and the spacing between adjacent spheres is calculated (Table 3). The maximum measurement error is $7\ \mu\text{m}$. To verify the effectiveness of the proposed method in measuring spacing of fuel particles in actual fuel elements, this paper implements 3D CT scanning reconstruction of a fuel element sample to obtain the reconstructed 3D CT image and the image of fuel particle distribution (Fig. 9). After the centroid coordinates of the target fuel particles are calculated, the spacing between adjacent spheres is calculated to obtain the measured spatial distance among fuel particles.

Conclusions In this paper, the fuel particles in a fuel element are tested and analyzed by availing the volume data from X-ray micro-CT, and an automatic algorithm based on improved SIFCM clustering and 3D region growing is proposed to achieve the segmentation of independent fuel particles in 3D CT images. Measurement experiments are carried out on simulated fuel particles, standard spheres, and fuel element samples to verify the feasibility and accuracy of the proposed algorithm. The calculation of the centroids, the search for the nearest centroids, and the calculation of the spacing between adjacent spheres are accomplished. In this way, the paper verifies the applicability of the proposed method and lays a foundation for characterizing the distribution uniformity of fuel particles in non-metallic matrix materials.

Key words X-ray optics; fuel particles; X-ray micro-computed tomography; spatial intuitionistic fuzzy C-means clustering; region growing; three-dimensional segmentation; automatic spacing measurement