

文章编号: 1004-4140 (2007) 03-0001-05

用于宇宙射线 μ 子成像的 MLS-EM 重建算法加速研究

刘圆圆, 赵自然, 陈志强, 张丽, 涂超

(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: 宇宙射线 μ 子检测技术具有穿透力强、对高 Z 材料敏感等特点, 特别适合检测特殊核材料, 是监控核材料走私的有效方式。图像重建问题是实现该技术的一个关键难点, MLS-EM 算法是目前成像质量较好的算法, 但其过长的运算时间制约了该算法在实际 μ 子检测系统中的应用。根据 μ 子检测系统的特点, 本文提出了一种加速方法, 在使用 POCA 重建图像作为迭代初值基础上进一步采用 OS 方法进行 EM 加速。模拟实验结果表明该方法能够有效地对 MLS-EM 重建算法进行加速, 这对于宇宙射线 μ 子成像技术早日投入实际应用具有积极的意义。

关键词: 宇宙射线 μ 子成像; 加速; 径迹重建法; 最大似然法; Geant4

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

宇宙射线 μ 子成像技术是一种有效的解决核材料走私的检测方式。目前, 有关宇宙射线 μ 子成像处理的算法主要有两种, 一种是径迹重建法 (the point of closest approach, POCA), 另一种是用最大似然的方法来进行重建 (maximum likelihood scattering, MLS), 目前, 我们实验室采用的是 EM 的方式去求解这个最大似然的问题, 即 MLS-EM 算法。这两种算法都有各自的特点, 首先, 由于 POCA 是一种径迹重建算法, 所以算法简单, 容易实现, 成像速度快, 但是, 成像质量较差; 而运用迭代方式求解的 MLS-EM 算法虽然较为费时, 但成像质量要比 POCA 重建出的图像好很多。所以这就促使我们去寻找一种有效的加速方法应用在 MLS-EM 中, 从而得到一种重建用时既少, 成像质量又高的重建算法。

1 算法概述

1.1 MLS-EM 重建算法

假设把探测区域分成 $N \times N$ 个栅格, 一共有 M 个 μ 子。其中的第 i 个 μ 子穿过被探测区域的第 j 个栅格的路径长度为 $l_{ij} (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N^2)$; L_i 表示第 i 个 μ 子通过物体的每一个栅格的路径长度之和; s_i 表示穿过物体以后的角度偏转量; λ_j 表示第 j 个栅格的散射密度; λ_j^n 表示第 j 个栅格的散射密度的第 n 次估计值; λ_j^{n+1} 表示第 j 个栅格的散射密度

收稿日期: 2007-09-06。

基金项目: 青年自然科学基金 (10605015); 国家自然科学基金 (10575059)。

的第 $(n+1)$ 次估计值; $\hat{\lambda}$ 为散射密度的向量表示; $\hat{\lambda}_j$ 表示 $\hat{\lambda}$ 的第 j 个分量; λ_{air} 表示空气的散射密度。则公式 (1) 为似然函数的表达式, 公式 (2) 为用 EM 方法求解公式 (1) 中似然函数的表达式。

似然函数^[1-2]:

$$\hat{\lambda}^* = \arg \min_{\hat{\lambda}} \sum_{i=1}^M [\ln(L_i \hat{\lambda}) + \frac{s_i^2}{L_i \hat{\lambda}}], \text{ 其中 } \hat{\lambda}_j \geq \lambda_{air} \quad (1)$$

EM 方法^[3]:

$$\lambda_j^{n+1} = \frac{\lambda_j^n}{\sum_{i=1}^M l_{ij}} \sum_{i=1}^M l_{ij} \frac{s_i^2}{\sum_{k=1}^M l_{ik} \lambda_k^n}, \text{ 其中 } \sum_{i=1}^M l_{ij} \neq 0 \quad (2)$$

1.2 引入初始值和 OS 方法对 MLS-EM 重建算法进行加速

MLS-EM 重建算法的不足之处在于它一次迭代的运算量非常庞大、运算时间长而且收敛速度比较慢, 这极大地限制了它的应用, 所以对其进行加速是十分有必要的。

为了加快收敛速度, 减少运算时间, 首先很容易会想到的方式是为其寻找一个尽量接近真实收敛点的初始值。由于 POCA 算法计算十分方便, 算法简单, 容易实现, 耗时很短, 成像速度又快, 虽然重建的精度不够高, 但是大体的上位置是正确的。因此, 在本文中选用径迹重建算法的结果作为 MLS-EM 重建算法的初始值, 从而在真正的使用加速方法之前就使用了一次预“加速”的处理。

为了对 MLS-EM 重建算法有效的进行加速, 本文选用的是在核医学领域中十分常见, 有效的加速方式, 即 OSEM 重建算法^[4]。OS 的基本思想来源于数值分析中的加速迭代算法, 这种重建算法是在 MLS-EM 算法的基础上, 先把所有的数据按照某种选择规则分成个 B 个独立的有序子集 (ordered subset), 然后分别利用每一个子集对图像进行更新, 即每进行一次子迭代就将图像更新了一次, 那么算法就由原来 MLS-EM 重建算法中的一次更新, 变成了 B 次更新。所以这种更新方法很明显要比用所有的数据作一次更新更加有效率。公式 (3) 即为用 OSEM 方法求解公式 (1) 中似然函数的表达式。

$$\lambda_j^{n+1} = \frac{\lambda_j^n}{\sum_{i \in A_b} l_{ij}} \sum_{i \in A_b} l_{ij} \frac{s_i^2}{\sum_{k=1}^M l_{ik} \lambda_k^n} \quad (3)$$

其中: $A_b (b=1, 2, \dots, B)$, 代表若干个互不相交的子集。 B 通常称为 OSEM 的阶数, 一般来说, B 阶的 OSEM 比传统 MLS-EM 重建算法收敛速度要快约 B 倍, 同时具有和 MLS-EM 重建算法一样好的重建质量。并且该算法通常只需要进行少数几次完整的迭代过程就能够获得比较满意的重建图像质量。

2 仿真实验

本次实验是采用 Geant4^[5] 软件对两个预先设定好具体参数, 并且分别实现不同检测目

的模型进行的仿真模拟实验，具体的模型参数见表 1。

系统主要设置：

- 坐标轴方向：纸面上从左往右为 x 轴正方向，从下往上为 z 轴正方向，穿出纸面的方向为 y 轴正方向。
- 探测面功能：上下探测面会记录 μ 子的入射和出射动量、入射点和出射点坐标、入射和出射方向信息。 μ 子只有当同时被上下探测面检测到才算是一次有效事件。
- μ 子能量：单能，大小为 4 GeV (μ 子的平均动能)。此时，铁、铅、铀的散射密度值分别为 $7.2\text{ mrad}^2/\text{cm}$ 、 $22.8\text{ mrad}^2/\text{cm}$ 、 $39.5\text{ mrad}^2/\text{cm}$ 。
- 方向抽样：沿 z 轴负方向，强度与该粒子与 z 轴负方向夹角的余弦平方值成正比。
- 位置抽样：在紧邻上探测面的上方，为提高效率，抽样面积由各个模型确定。

在表 1 中模型参数基础上的模型一、二的几何结构如图 1 和图 3 所示；模型一、二的 xy 平面 Geant4 模拟输出如图 2 和图 4 所示。

表 1 模型参数

模型	探测区域面积	待测物及参数	设计此模型目的	位置抽样面积
模型一	$1\text{ m}\times 1\text{ m}$	从上到下依次放置铁球、铅球、铀球，球的半径均为 5 cm，球间距均为 30 cm	检验重建算法对竖直方向重叠放置的小物体的识别能力	$80\text{ cm}\times 20\text{ cm}$
模型二	$1\text{ m}\times 1\text{ m}$	在中心放置一个铁球，球的半径为 30 cm	检验算法重建对单个大物体的识别能力	$100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$

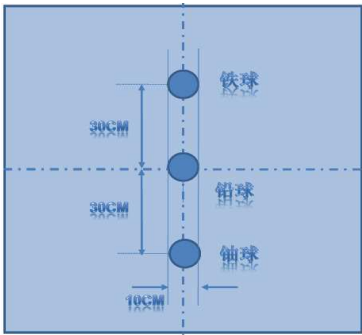


图 1 模型一的几何结构

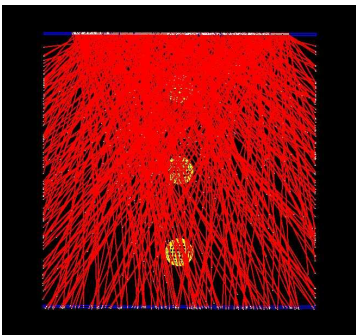


图 2 模型一的 xy 平面 Geant4 模拟输出

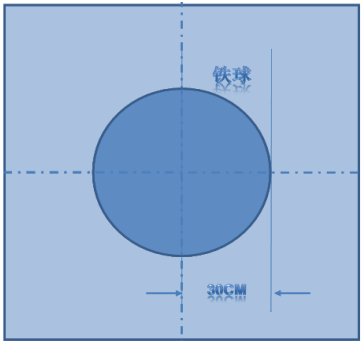


图 3 模型二的几何结构

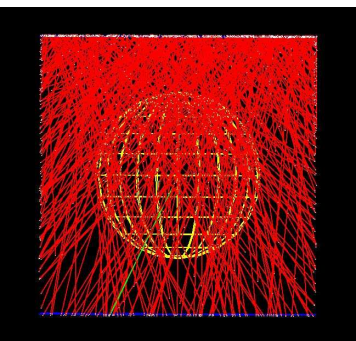
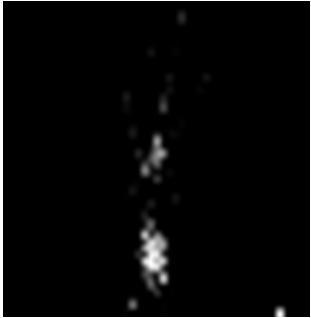
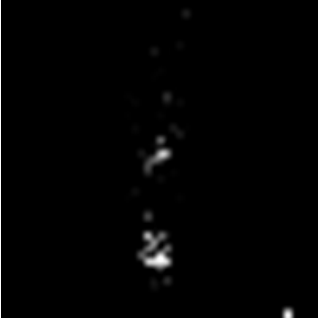




图 4 模型二的 xy 平面 Geant4 模拟输出

3 实验结果

表 2 实验参数与结果

实验参数	假设入射 μ 子 10000 个，重建 50×50 像素的图像，迭代 20 次，子集个数 5 个，即每个子集由 2000 个 μ 子组成	
实验模型	没引入初始值和 OS 的 MLS-EM	引入初始值和 OS 的 MLS-EM
模型一		
模型二		

从表 2 中实验结果可以看到，当迭代同样次数（20 次）时，进行加速后的 MLS-EM 算法的重建结果要比没有引入加速条件的结果好很多。在模型一中，加速后各个球之间的伪影要明显少于未经加速时的重建结果；在模型二中，加速后的结果已经可以分辨出有球形大物体的存在，而此时未经加速得到的重建结果仍然成大片伪影状，基本上不能进行鉴别。所以，表 2 中的实验结果证明了此加速方法的有效性。

4 结论

引入初始值和 OS 方法对 MLS-EM 重建算法进行加速，有效的提高了收敛速度，大大减少了运算时间，对于宇宙射线 μ 子成像处理技术早日应用在实际检测中具有积极的意义。当然此方法还有一些不足之处，例如在本文中，对于子集的选取只是简单的尝试将 10000 个 μ 子按自然顺序均分成 5 组，但事实上，可以寻找更优秀的分组方式，让 EM 算法收敛得更快，所以还需要继续进一步进行研究，争取得到更好的加速方法和结果。

参考文献

[1] Schultz L J. Cosmic Ray Muon Radiography[D]. PhD thesis, Portland State University, 2003.
[2] 涂超，赵自然，张丽. 天然宇宙射线 μ 子成像检测技术研究进展. 中国体视学与图像分析[J], 2006, 11(4): 284-287.

- [3] Ollinger J M. Maximum-Likelihood Reconstruction of Transmission Images in Emission Computed Tomography via the EM Algorithm. IEEE Transactions on Medical Imaging[J], 1994, 13(1):89-101.
- [4] Malcolm H, Larkin R S. Accelerated Image Reconstruction Using Ordered Subsets of Projection Data[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, 13(4): 601-609.
- [5] 曾志, 李君利, 程建平. Geant4 在核技术领域的应用[J]. 同位素, 2005, 11(1-2): 55-58.

Research on Accelerating MLS-EM Reconstruction Algorithm for Cosmic Ray Muon Radiography

LIU Yuan-yuan, ZHAO Zi-ran, CHEN Zhi-qiang, ZHANG Li, TU Chao

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Cosmic ray muon radiography which has a good penetrability and sensitivity to high-Z materials is an effective way for detecting shielded nuclear materials. Reconstruction algorithm is the key point of this technique. Now, MLS-EM reconstruction algorithm is a better one than other existing radiographic methods. However, its reconstruction time is too long to let it be used into a real detective system. Because of that, based on the characteristics of the muon radiography system, this paper proposed a good method to accelerate MLS-EM. It used the POCA algorithm as the initial value of the EM, and then accelerated the algorithm using the function of the OS. Finally, the simulation experiments demonstrated that this method could effectively accelerate MLS-EM. Therefore, it played a significant role to do a further step to let the technique of cosmic muon radiography into our real life.

Key words: cosmic ray muon radiography; accelerate; POCA; MLS-EM; Geant4

作者简介: 刘圆圆 (1983—), 女。清华大学工程物理系, 硕士研究生, 现主要从事 CT 图像处理方面的研究。Tel: 010-62791743, E-mail: liuyuan06@mails.tsinghua.edu.cn。