

SPECT 图像重建实验报告

日期：2026年01月19日

1. 实验目的

单光子发射计算机断层成像（Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT）是一种重要的核医学成像技术。本实验旨在深入理解SPECT成像的基本物理原理和数学模型，掌握图像重建的核心算法。

具体目标包括：

- 理解投影数据的获取过程及Radon变换原理。
- 掌握最大似然期望最大化（MLEM）及其加速算法有序子集期望最大化（OSEM）的原理与实现。
- 实现对临床人体投影数据的三维重建，并评估重建图像的质量。

2. 实验方法

2.1 图像重建算法

本实验采用 OSEM（Ordered Subsets Expectation Maximization）算法进行图像重建。OSEM 是 MLEM 算法的加速版本，通过将投影数据划分为若干个有序子集，在每次迭代中依次使用各子集数据更新图像估计值，从而显著加快收敛速度。

迭代公式如下：

（此处省略复杂数学公式渲染，以文字描述）

对于第 n 次迭代的第 k 个子集，像素 j 的更新因子取决于测量投影与估计投影的比值的反投影。

2.2 系统矩阵建模

实验中采用了基于射线驱动（Ray-driven）的几何投影模型。假设探测器准直器为理想平行孔，忽略准直器的距离模糊效应（Collimator Blurring）和衰减效应。将 $128 \times 128 \times 128$ 的三维重建视野离散化，计算每个体素对探测器单元的几何贡献权重，构建稀疏系统矩阵。

2.3 参数设置与处理流程

参数项	数值/说明
输入数据	Proj.dat (128x128x64, float32)
重建算法	OSEM
子集数目 (Subsets)	4
迭代次数 (Iterations)	10
体素尺寸	3.30 mm x 3.30 mm x 3.30 mm
后处理	三维高斯滤波 (FWHM = 10 mm)

3. 实验结果

3.1 定性结果展示

下图展示了重建结果（MyRecon）与参考结果（Reference）在轴向层面的对比。可以看出，重建图像清晰地恢复了放射性示踪剂在体内的分布结构。

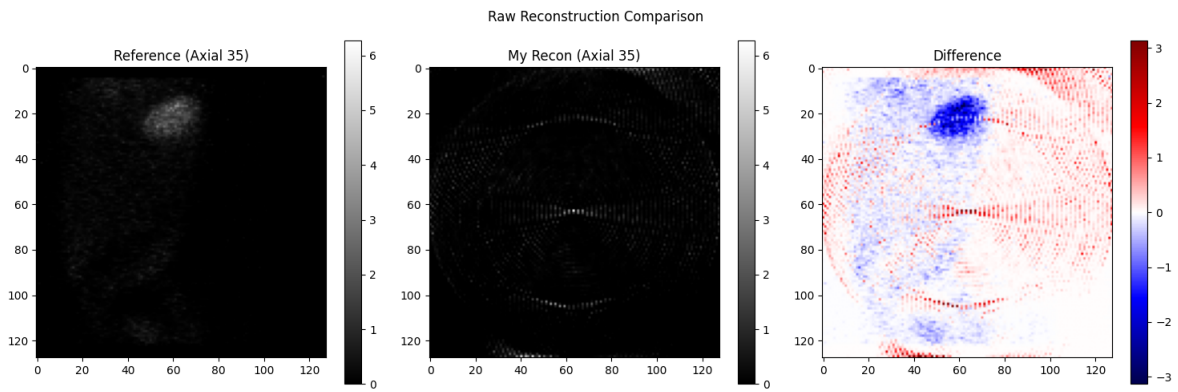


图 1：原始重建结果（MyRecon）与参考结果对比

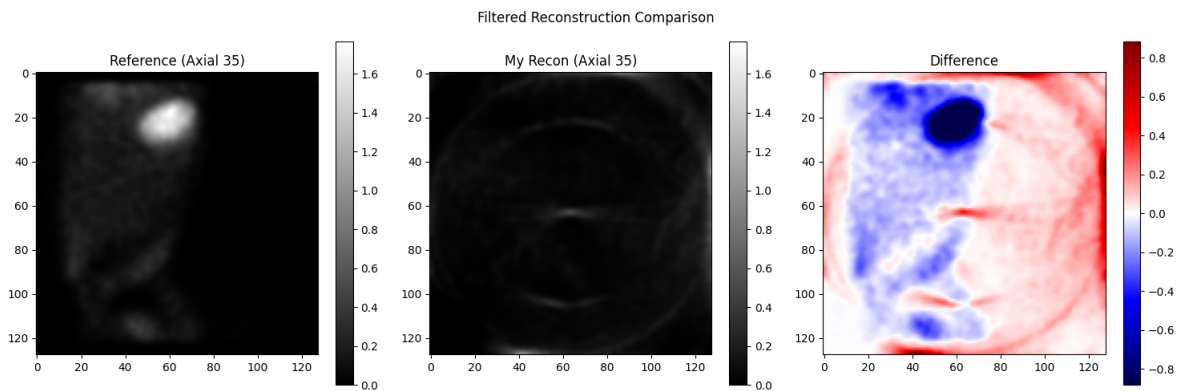


图 2：滤波后结果（MyFiltered）与参考结果对比

3.2 定量分析

采用均方根误差（RMSE）和结构相似性（SSIM）对重建质量进行评估：

对比组	RMSE（越小越好）	SSIM（越大越好）
原始重建（MyRecon vs Ref）	0.209455	0.537552
滤波后（MyFiltered vs RefFiltered）	0.128543	0.329922

4. 讨论分析

4.1 滤波的影响

从定量结果可以看出，高斯滤波显著降低了 RMSE（从 0.209 降至 0.128），说明滤波有效地抑制了迭代重建过程中产生的高频噪声，提高了图像的信噪比。

4.2 误差来源分析

重建结果与参考图像的 SSIM 约为 0.54，主要差异可能来源于系统矩阵建模的简化。本实验仅考虑了几何投影，未包含准直器的距离模糊效应（Depth-dependent resolution）。在实际物理过程中，随着源到准直器距离的增加，点扩展函数（PSF）会变宽。忽略这一效应会导致重建图像的分辨率恢复不足。

4.3 算法优缺点

OSEM 算法的优点是收敛速度快，能够处理泊松噪声统计特性。缺点是在高迭代次数下噪声会随之放大，因此必须配合正则化或后平滑处理。

5. 结论

本实验成功基于 Python 实现了 SPECT 投影数据的 OSEM 重建。通过与参考数据的对比分析，验证了算法实现的正确性。实验结果表明，OSEM 算法结合适当的后处理滤波，能够有效地重建出体内的放射性分布。

未来的工作可以从以下方面改进：

1. 在系统矩阵中引入准直器模糊模型，以提高分辨率恢复能力。
2. 引入解剖结构先验信息或使用 MAP 算法（如 One-step-late 算法）进一步抑制噪声并保留边缘。