# 专栏—— 核医学与分子影像

**栏目主编：**何作祥



何作祥，清华大学长聘教授，清华大学北京清华长庚医院核医学科主任，始终致力于影像医学与核医学工作。先后主持国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大国际合作项目、国家重大科研仪器研制项目、国家重点研发计划项目等科研课题，研究成果发表在*Circulation*、*IEEE Transactions on Medical Imaging*、*Journal of Nuclear Medicine*等专业领域顶级期刊，获国家科技进步奖二等奖等奖项。现兼任中国核学会医学物理分会理事长、中国生物医药技术协会医工结合分会理事长、中国核工业教育学会核医学人才分会会长等职务。

**栏目简介：**

近年来，核医学与分子影像发展迅速，特别是核医学诊疗一体化及国产核医学分子影像设备方面。90Y 微球介入治疗是新型诊疗一体化诊治方法，对核医学内照射治疗，内照射剂量估算是决定治疗效果的决定性因素，国产高性能的分子影像设备给核医学精准诊疗及研究提供了可靠的工具。本专栏聚焦核医学与分子影像的研究热点，对国产手持伽马相机、90Y 微球介入治疗操作、内照射剂量学工具方面新的研究进行报道。

# 基于自准直成像思想的术中手持伽马相机

张雨溪[1] 胡一凡[2] 吕振雷[1] 张玉方[1] 孙立风[1] 孙钰林[3] 周旭[3] 温凯[3] 马天予[1*]

（1.清华大学工程物理系，北京 100084；2. 耶鲁大学放射与生物医学影像学系，纽黑文 06520，美国；
3. 原子高科股份有限公司研发部，北京 102413）

**【摘要】** 伽马相机是放射引导手术中获取实时分子影像信息的关键设备，在肿瘤精准切除、前哨淋巴结定位及残留病灶评估等临床应用中具有重要作用，其性能直接影响放射引导手术的准确性与可靠性。针对现有术中手持伽马相机普遍依赖机械准直器而导致的探测效率低、系统重量增加及视野受限等问题，本文提出并研制了一种基于自准直成像思想的术中手持伽马相机，并对其关键性能及典型应用进行测试。该伽马相机采用三维稀疏交错排布的铈掺杂的镓酸铝酸钆（Ce: $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$, Ce: GAGG）晶体与玻璃单元构成探测器，在无机械准直器的条件下通过探测器单元间的自准直效应实现高性能成像。实验结果表明，该系统在距离探测器 30 ~ 100 mm 的 100 mm × 100 mm 的视野内的探测效率为（7.55 ± 2.97）× $10^3$ cps/MBq；在距探测器 5 cm 和 10 cm 处分别实现了 4 mm 和 10 mm 的空间分辨率；对淋巴结模型的三维定位偏差在 3 个维度上均小于 2 mm。在小鼠前哨淋巴结显像实验中，即使在淋巴结活度显著低于临床术中人体前哨淋巴结典型活度水平的条件下，系统仍可实现清晰成像与准确定位。研究结果表明，基于自准直成像思想的术中手持伽马相机在无需机械准直器的情况下，兼顾了高探测效率与空间分辨能力，具备良好的低活度成像性能，具有为放射引导手术提供有效术中成像的巨大应用潜力。

**【关键词】** 伽马相机；放射引导手术；自准直成像；空间分辨率；探测效率

**【中图分类号】** TH77; TP18; R734.2 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202601001

## A hand-held intraoperative gamma camerabased on self-collimation

*Zhang Yuxi[1], Hu Yifan[2], Lyu Zhenlei[1], Zhang Yufang[1], Sun Lifeng[1], Sun Yulin[3], Zhou Xu[3], Wen Kai[3], Ma Tianyu[1*]*

*(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Radiology and Biomedical Imaging, Yale University, New Haven 06520, United States of America; 3. R&D Department, HTA Co., Ltd., Beijing 102413, China)*

**【Abstract】** Intraoperative gamma cameras are key devices for acquiring real-time molecular imaging information

**基金项目：**国家原子能机构核技术研发项目［HJSYF2024（28）］；北京市自然科学基金重点研究专题项目（Z220010）

**第一作者：**张雨溪，女，在读博士研究生，研究方向：核医学影像物理与仪器

**通信作者：**马天予，男，博士研究生，长聘副教授，研究方向：核医学影像物理与仪器

in radioguided surgery, playing an important role in clinical applications such as precise tumor resection, sentinel lymph node localization, and residual lesion assessment. Their performance directly affects the accuracy and reliability of radioguided surgical procedures. To address the limitations of existing intraoperative gamma cameras, which generally rely on mechanical collimators and consequently suffer from reduced sensitivity, increased system weight, and restricted field of view, this study proposes and develops a handheld intraoperative gamma camera based on self–collimation theory, and evaluates its key performance characteristics and representative applications. The proposed gamma camera employs a detector array composed of three–dimensionally sparse, interlaced Ce: GAGG crystal and glass elements, enabling self–collimating imaging without the use of conventional mechanical collimators. Experimental results demonstrate that the system achieves a sensitivity of $(7.55\pm2.97)\times10^3$ cps/MBq within a 100 mm×100 mm field of view at source–to–detector distances ranging from 30 to 100 mm. Spatial resolutions of 4 mm and 10 mm are achieved at distances of 5 cm and 10 cm, respectively. The three–dimensional localization errors of lymph node models are less than 2 mm in all three dimensions. In mouse sentinel lymph node imaging experiments, clear visualization and accurate localization of lymph nodes are achieved even when the activity level is significantly lower than the typical activity of human sentinel lymph nodes during clinical radioguided surgery. These results demonstrate that the self–collimation–based handheld intraoperative gamma camera, by eliminating the need for mechanical collimators, achieves a favorable balance between high sensitivity and spatial resolution, exhibits excellent low–activity imaging performance, and shows strong potential for providing effective intraoperative imaging in radioguided surgery.

**【Key words】** Gamma camera; Radio–guided surgery; Self–collimation; Spatial resolution; Sensitivity

放射引导手术是一种基于分子影像信息引导外科手术过程的现代手术技术，该技术通过在术前或术中向患者体内注入放射性示踪剂，利用其在特定组织或病灶中的选择性富集特性，在手术过程中为外科医生提供功能与代谢层面的位置信息，从而辅助精准切除病灶并最大程度保留正常组织[1]。放射引导手术在多种临床场景中已展现出重要价值，例如肿瘤切除中的病灶定位、前哨淋巴结活检中淋巴结的识别以及残留病灶评估等[2–5]。与单纯依赖术前影像或术者经验相比，放射引导手术技术能够提供更加直观、客观的功能信息，有助于减少漏切和过度切除，提高治疗效果。

放射引导手术的应用场景对成像设备提出了与常规核医学成像系统截然不同的要求，包括良好的便携性、快速响应能力以及在低放射性活度下的成像性能。围绕放射引导手术和术中分子影像的应用需求，近年来国内外学者开展了大量关于小型化伽马相机的研究工作，例如：使用掺铊碘化钠晶体［Tl–doped sodium iodide crystal, NaI（T）］探测器搭配平行孔准直器的术中手持式伽马相机（intraoperative handheld gamma camera, IHGC）[6]；使用碲锌镉（CdZnTe, CZT）探测器的手持式伽马相机（CrystalCam）[7]；使用针孔准直器和电荷耦合器件（charge coupled device, CCD）的微型伽马射线相机（mini gamma ray camera, MGRC）[8]。

尽管现有关于术中引导伽马相机的研究在探测器、系统集成和应用场景拓展方面取得了一定进展，但现有研究工作主要依赖重金属准直器（如平行孔准直器和针孔准直器）来实现光子的定向效果。准直器通过几何结构限制入射光子的方向，使得只有沿特定方向的伽马光子可以抵达探测器，从而获得光子的方向信息，但其他方向光子全部被准直器阻挡吸收，使得探测效率和分辨率不能同时兼顾。此外，重金属准直器还存在系统重量大、视野受限于准直器设计等问题，影响设备的便携性和实用性。

本研究设计了一种基于创新的自准直成像思想的术中手持伽马相机。该相机摆脱了传统准直器的限制，同时实现了高探测效率、高空间分辨率、大成像视野、轻量便携等特性。本文阐述该相机的设计方案、主要结构组成、信号标定与处理方法，测评其主要性能指标，并展示典型应用示例。

## 1 基于自准直成像思想的术中手持伽马相机基本原理和技术

### 1.1 系统结构设计

术中手持伽马相机探测器结构如图 1 所示。它是由前后交错排布的三维稀疏小探测器单元阵列组成的。每个小探测器单元都是铈掺杂的镓酸铝酸钆（Ce: $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$, Ce: GAGG）晶体，形状为边长 2.0 mm 的正方体。8 个小晶体单元和 8 个形状、大小与之相同的玻璃单元交错排列组成 32.0 mm × 2.0 mm × 2.0 mm 的晶体条，如图 1A 所示。将 16 × 16 根晶体条按照如图 1B 所示形状排列，其中“×”位置的晶体条的最上层是晶体单元，空白位置的晶体条的最上层是玻璃单元，相邻晶体条间隔 2.2 mm，由此组成了整体探测器模块，如图 1C 所示。探测器模块大小为 67.2 mm × 67.2 mm × 32.0 mm。

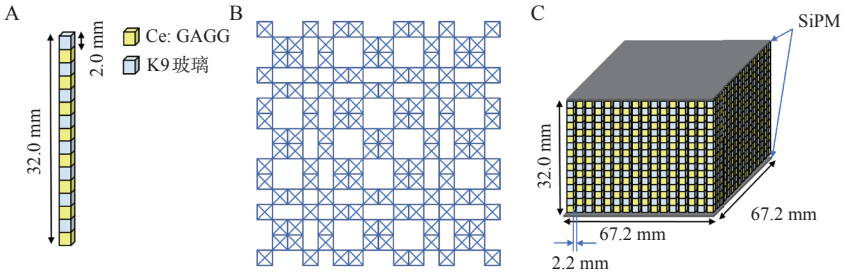



**图 1** 术中手持伽马相机探测器结构 A 为晶体条结构；B 为晶体条排列方式；C 为探测器整体结构

为了确定伽马事件在探测器中的作用位置，探测器两端均耦合了硅光电倍增管（silicon photomultiplier, SiPM）阵列，如图 1C 所示。采用 SiPM 单元与晶体条一对一耦合的方式，根据 SiPM 单元的触发信号，定位与伽马光子发生相互作用的晶体条。采用双端读出技术，通过对晶体条两端信号的联合分析，确定伽马光子在晶体条中的相互作用位置及其对应的晶体单元[9]。

探测器使用了自主研制的专用集成电路（application-specific integrated circuit, ASIC）芯片进行信号读出。该 ASIC 芯片从 SiPM 接收波形信号并对波形信号进行加权和简并，获得表示伽马事件作用位置信息的 X、Y 信号和表示能量信息的 E 信号[10]。这些模拟信号被传输到数据采集板（digital processing board, DPB）上转化成数字信号，并被打包传输到上位机电脑中。

### 1.2 成像原理

术中手持伽马相机探测器的设计应用了自准直成像思想[11]。尽管没有机械准直器限制伽马光子的入射方向，但在三维稀疏排布的探测器中，探测器单元不仅可以探测伽马光子，还由于其对伽马光子的吸收和遮挡作用，可以作为后排探测器单元的准直器，并为其约束和提供伽马光子的方向信息。如图 2 所示，空间中处于不同位置的放射源在探测器上产生不同的计数分布，由此可以根据探测到的投影数据经图像重建，得到放射源在视野内的空间分布。

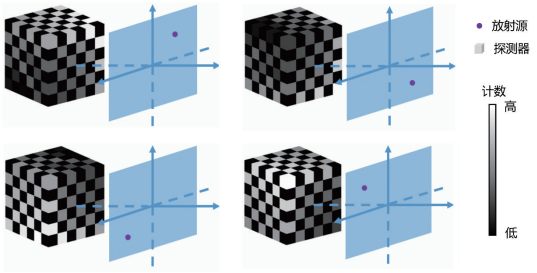



**图 2** 成像原理示意

上述设计使术中手持伽马相机无需机械准直器即可实现有效成像，从原理层面突破了机械准直原理对图像分辨率和探测效率的制约，使得伽马相机有可能同时达到高探测效率和高空间分辨率，适用于快速、低活度成像场景。同时，无准直器设计还显著降低了系统的重量和体积，提升了成像视野，从而有效扩展术中引导应用场景的适用性。

### 1.3 探测器信号标定

使用 $^{99m}$Tc 泛场源进行探测器信号标定。采集泛场源照射后的数据，根据 X、Y 位置信号生成

泛场直方图，并手动分割得到每根晶体条的位置查找表。根据两端SiPM获得的能量信号E1和E2，得到每根晶体条中的伽马事件作用位置查找表。

使用活度3 mCi、直径0.7 mm的$^{99m}$Tc点源测量三维系统传输矩阵。通过在距探测器不同深度位置设置多个扫描平面，对点源进行逐平面扫描，以获取系统在三维空间内的响应。各扫描平面与探测器表面的距离分别为30 mm、40 mm、50 mm、60 mm、80 mm和100 mm。每个扫描平面的覆盖范围为100 mm × 100 mm，像素尺寸为2 mm × 2 mm。

### 1.4 重建算法

使用最大似然期望最大化（maximum likelihood expectation maximization, MLEM）算法进行图像重建[12]。根据采集到的投影数据和系统传输矩阵计算最可能的放射源分布图像，多步迭代后得到最终重建图像。MLEM算法的迭代公式如下：

$$f^{k+1}=\frac{f^k}{C^T1}\cdot\left(C^T\frac{p}{Cf^k}\right) \quad (1)$$

其中，$f^k$是第$k$次迭代后的重建图像，$p$是探测到的投影，$C$是1.3中标定的系统传输矩阵。

在低放射性活度、快速采集条件下，本研究所提出的术中手持伽马相机采用MLEM图像重建算法，在约500次迭代后即可获得放射源分布的近似重建结果。需要指出的是，针对不同成像任务和应用场景，最优的迭代次数并非固定不变。在放射性活度较高或采集时间较长的条件下，可适当增加迭代次数，以进一步提升图像细节表现和空间分辨能力。

## 2 术中手持伽马相机主要性能测评

### 2.1 探测效率

通过术中手持伽马相机对点源的逐点扫描获得在距离探测器30 ~ 100 mm范围内100 mm × 100 mm视野内的探测效率，如表1所示。在该系统视野内的伽马放射源发射1 MBq的伽马光子，可以被探测器探测的计数率为（7.55 ± 2.97）× 10$^3$。在相同或相近条件下，该系统的探测效率是现有的手持伽马相机的3 ~ 5 000倍[6–8, 13–16]。

**表1** 系统探测效率

| 到探测器的距离（mm） | 探测效率均值（cps/MBq） | 探测效率标准差（cps/MBq） |
|---|---|---|
| 30 | $1.20\times10^4$ | $1.59\times10^3$ |
| 40 | $1.00\times10^4$ | $1.08\times10^3$ |
| 50 | $7.97\times10^3$ | $6.92\times10^2$ |
| 60 | $6.80\times10^3$ | $4.84\times10^2$ |
| 80 | $4.69\times10^3$ | $2.54\times10^2$ |
| 100 | $3.85\times10^3$ | $1.64\times10^2$ |
| 总视野 | $7.55\times10^3$ | $2.97\times10^3$ |

### 2.2 空间分辨率

在距离术中手持伽马相机5 cm和10 cm的位置，分别放置两个活度为3 mCi的$^{99m}$Tc点源，两点源间距为4 mm和10 mm，使用术中手持伽马相机分别探测5 s，成像结果如图3所示。在距离术中手持伽马相机5 cm的位置可以达到4 mm的空间分辨率，在距离相机10 cm的位置可以达到10 mm的空间分辨率。

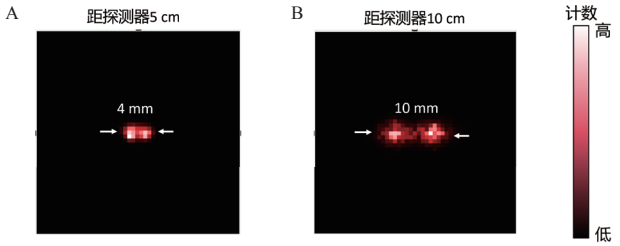



**图3** 分辨率测试 A为当放射源到探测器距离为5 cm时，空间分辨率为4 mm；B为当放射源到探测器距离为10 cm时，空间分辨率为10 mm

### 2.3 三维定位精度

使用直径为5 mm的球形放射源模拟人体淋巴结成像场景，如图4A所示。将球形放射源依次放置在距离术中手持伽马相机表面40 mm、50 mm、60 mm、80 mm的位置，在正对探测器中心40 mm × 40 mm的范围内，按照2 mm的间隔逐点扫描并进行图像重建。如图4B所示为两个典型位置的球形放射源的三维重建图像。

通过计算重建图像重心位置来定位球形放射源，所得定位与球形放射源真实中心位置在3个维度上的偏差如表2所示。对于所有位置的球形放射源，术中手持伽马相机在3个维度上的定位偏差均小于2 mm。

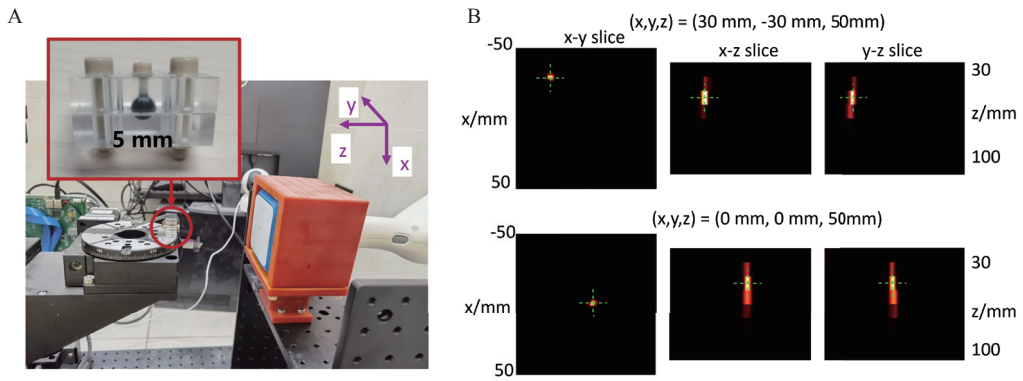



**图 4** 淋巴结模型的三维成像 A 为淋巴结模型成像实验场景；B 为典型淋巴结模型的三维成像结果

**表 2** 淋巴结模型三维定位偏差

| 维度 | 定位偏差均值（mm） | 定位偏差标准差（mm） |
|---|---|---|
| *X* 方向 | 0.60 | 0.42 |
| *Y* 方向 | 0.65 | 0.54 |
| *Z* 方向 | 1.14 | 0.84 |

## 3 术中手持伽马相机典型应用示例

前哨淋巴结示踪是放射引导手术中一个成熟且具有代表性的应用场景，在主要经淋巴途径转移的恶性肿瘤如乳腺肿瘤和恶性黑色素瘤等的治疗中已得到广泛应用[2–3]。在该类应用中，$^{99m}$Tc–硫胶体是最常用且最具代表性的核素示踪药物之一[17–18]。$^{99m}$Tc–硫胶体药物在肿瘤周围局部注射后，其颗粒能够沿淋巴管迁移并在前哨淋巴结内被吞噬滞留，从而在显像中形成稳定、局部集中的放射性分布特征。$^{99m}$Tc–硫胶体前哨淋巴结显像由于其成熟的临床应用基础和良好的示踪特性，已成为相关成像设备验证时常用的标准应用模型。

基于上述应用背景，本研究选用小鼠淋巴结显像作为术中手持伽马相机的应用验证场景。实验中，在小鼠右后足皮下注射约 80 μCi 的 $^{99m}$Tc–硫胶体，药物经淋巴回流后可以在小鼠大腿部位的前哨淋巴结处发生明显聚集。注射后 30 min，将术中手持伽马相机固定于距小鼠 5 cm 处进行成像数据采集，采集时间为 1 min，实验布置如图 5A 所示。为减少注射点高放射性对前哨淋巴结显像的干扰，在成像过程中使用小块铅皮对注射点进行局部屏蔽。所得体内显像结果如图 5B 所示，可以清晰分辨出小鼠前哨淋巴结的放射性分布。注射后 150 min，将小鼠处死并解剖取出前哨淋巴结和次级淋巴结，其放射性活度分别约为 0.9 μCi 和 0.2 μCi。将两枚淋巴结置于距术中手持伽马相机 5 cm 处进行离体成像，采集时间同样为 1 min，离体显像结果如图 5C 所示。结果表明，在极低放射性活度条件下，该系统仍能够同时分辨并定位两级淋巴结。

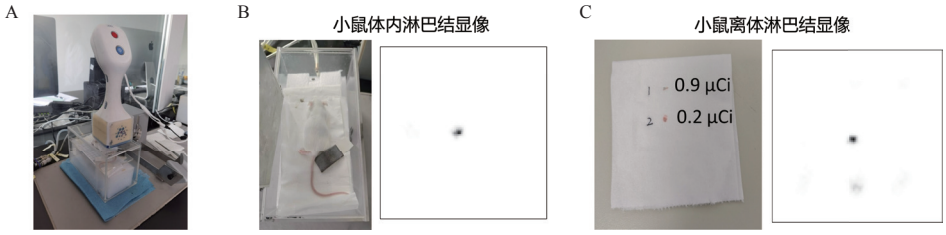



**图 5** 硫胶体小鼠淋巴结显像 A 为小鼠淋巴结显像实验场景；B 为小鼠体内淋巴结显像对象和结果；C 为小鼠离体淋巴结显像对象和结果

需要指出的是，小鼠淋巴结中放射性活度的摄取水平显著低于临床前哨淋巴结活检术中人体前哨淋巴结的典型活度范围[19]。在此低活度下，术中手持伽马相机仍可实现对前哨淋巴结的清晰成像，表明该系统在灵敏度和低活度放射源信号探测能力方面具有明显优势。这一结果进一步验证了术中手

持伽马相机在前哨淋巴结定位及相关应用场景中的潜在实用价值。

## 4 手持伽马相机性能对比与工程化展望

本文提出了一种基于自准直成像思想的新型术中手持伽马相机，并通过原型系统实验对相机性能进行了验证。该相机在不依赖传统机械准直器的情况下，利用三维稀疏交错排列的Ce: GAGG晶体与玻璃探测器单元，实现了较高的探测效率与空间分辨率，并在小鼠淋巴结成像实验中展示了在低活度场景下的应用潜力。

### 4.1 手持伽马相机系统性能对比

为了进一步说明该相机的优势，汇总并对比了近年来文献中报道的具有代表性的手持伽马相机系统的关键性能指标，包括成像视野范围、探测效率及空间分辨率等参数，见表3。通过与已有研究结果的横向对比，可对本系统在同类设备中的性能定位形成直观认识。

需要指出的是，术中手持伽马相机作为一种新兴的创新型医疗影像设备，目前尚缺乏用以规范不同系统在性能评估过程中测试条件与评价方法的统一的工业或行业测试标准。因此，表中所列各项性能指标的具体数值，可能受到不同研究在测试几何条件、放射源类型、能窗设置以及评价方法等方面差异的影响，相关对比结果应在上述前提下进行理解。

**表3** 不同手持伽马相机系统性能对比

| 伽马相机 | | 视野范围 | 探测效率均值（cps/MBq） | 空间分辨率（mm） |
|---|---|---|---|---|
| 本研究 | | 10 cm × 10 cm<br>@ 3 ~ 10 cm | （7.55 ± 2.97）× $10^3$<br>@3 ~ 10 cm | 4 @ 5 cm<br>10 @ 10 cm |
| IHGC [6] | | 5 cm × 5 cm | 270 | — |
| MGRC [8] | | 4 cm × 4 cm | 1.5 @ 4.5 cm | 1 @ 2.5 cm |
| CrystalCam [7, 15–16] | LEHR | 4 cm × 4 cm | 590 | 5.4 @ 3.5 cm |
| | LEHS | | 2 500 | 9.2 @ 3.5 cm |
| KoglerCam [13] | | 6.3 cm × 6.3 cm | 171 ± 6.2 @ 10 cm | 11 @ 5 cm<br>18 @ 10 cm |
| Seracam [14] | | 7.76 cm × 7.76 cm<br>@ 5 cm | 3.6 ~ 52.2 @ 5 cm | 4.6 ~ 26.0 @ 5 cm |

注：“@ x”表示相应性能指标的测试距离，即放射源与相机表面之间的距离。

表3中“@ x”表示相应性能指标的测试距离，即放射源与相机表面之间的距离。若原文献中未明确给出测试条件，则表中不再额外标注。需要注意的是，不同研究中“空间分辨率”的定义和测量方法并不完全一致。除本文采用的最小可分辨双点源间距外，部分文献还采用热圆柱阵列中可分辨的最小柱径、重建图像的半高宽（full width at half maxima, FWHM）等指标。因此，即使是同一系统，在不同测量方法下得到的空间分辨率结果也可能存在差异。对于CrystalCam系统，由于其可分别搭配低能耗高分辨率（low energy high resolution, LEHR）和低能耗高灵敏度（low energy high sensitivity, LEHS）两种准直器，本文在表中分别列出了两种配置下的性能指标。对于Seracam系统，由于其可以搭配不同孔径的针孔准直器，性能指标随准直器参数变化，本文在表中给出了它在不同准直器下的性能指标变化范围。对于文献中未明确给出设备名称及型号的手持伽马相机，则在表中以第一作者姓名进行标识。

### 4.2 工程化挑战与展望

为推动术中手持伽马相机向临床应用转化，有必要对其开展系统性的工程化设计与优化。如图6A所示为本文研制的术中手持伽马相机原型机外观。在原型机设计中，于探测器前端集成辅助光学定位激光模块，用于在实际术野中标示成像视轴方向，从而建立重建图像与手术操作空间之间的直观空间对应关系，提升术中放射性靶点定位的操作便利性。在结构布局方面，将数据采集电子学模块与探

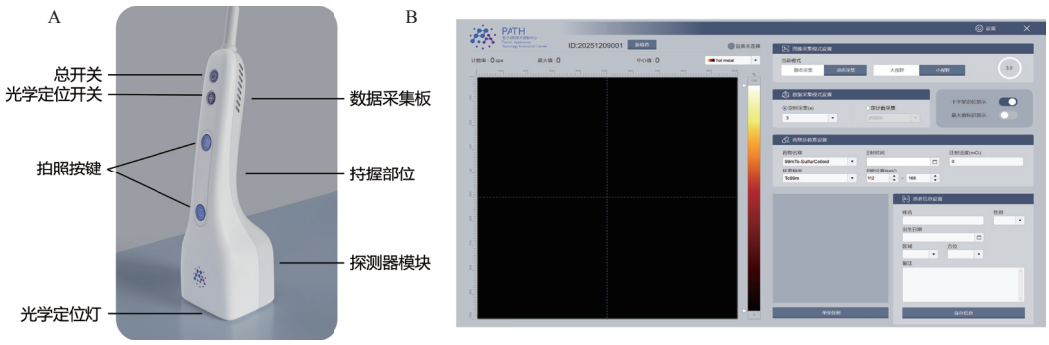



**图 6** 术中手持伽马相机原型机外观与上位机软件界面 A 为术中手持伽马相机原型机外观；B 为术中手持伽马相机的上位机软件界面

测器模块分别布置于握持部位的两端。一方面，该布局有助于改善系统整体散热条件，降低电子学模块热积累对探测器稳定性的潜在影响；另一方面，通过对整机质量分布的优化，实现了前后重量的相对平衡，从而提升了手持操作过程中的稳定性与舒适性。原型机整机重量约为 800 g，能够满足临床术中长时间手持操作对设备重量的要求。

如图 6B 所示为术中手持伽马相机的上位机软件界面。该软件集成了设备运行状态监控、辐射图像实时显示、成像参数配置及数据管理等功能，可支持动态与静态两种成像模式，并提供灵活可配置的数据采集与显示策略。同时，软件支持与成像过程相关的临床信息记录与图像数据存储，满足术中操作记录及术后回溯分析的需求。图像重建速度是实现实时显示的关键因素之一。上位机软件运行于一台配置有 Intel Core i9–13900HX CPU、16 GB 内存及 NVIDIA GeForce RTX 4070 GPU 的笔记本计算平台上，采用包含 4 个子集的有序子集期望最大化（ordered subsets expectation maximization, OSEM）算法进行图像重建。在当前硬件配置条件下，单帧重建时间不超过 1 s，能够满足临床术中对近实时成像与交互显示的应用需求。

在安全与封装设计方面，原型机内部对探测器模块进行了整体密封与遮光处理，以有效隔离自然光对 SiPM 信号的干扰，同时防止灰尘颗粒及液体渗入探测器区域，从而保障探测器长期运行的稳定性与可靠性。系统外壳采用具有良好化学稳定性和耐腐蚀性的工程塑料材料，能够适应手术室环境下常规的擦拭消毒与表面清洁流程，满足术中使用对器械清洁与重复消毒的基本要求。此外，原型机内部关键电子学区域贴覆电磁屏蔽材料，以降低设备在临床环境中与其他手术设备、监护设备及影像系统之间的电磁干扰风险，提升系统在复杂电磁环境下的工作稳定性。上述封装与防护设计从光学、机械及电磁等多个层面综合考虑了临床使用场景下对安全性、可靠性与可维护性的要求，为后续进一步开展临床验证与产品化设计奠定了基础。

在成本与定价方面，本研究采用了由 Ce: GAGG 闪烁体与 SiPM 器件构成的探测器方案。近年来，Ce: GAGG 闪烁体已实现全面国产化供应，其制造工艺日趋成熟，材料及加工成本持续下降；同时，SiPM 器件亦已有多家国内厂商完成研发并进入商业化供应阶段，使关键探测器器件在成本与供应链层面具备良好的自主可控性潜力。本系统的另一重要特征在于自主开发并应用了定制化 ASIC 芯片，在满足系统性能需求的同时，其单位成本及长期供应稳定性均可有效控制。现有商业化术中手持伽马相机 CrystalCam 的核心探测器采用 CZT 半导体材料，其单个探测器模块的器件成本显著高于本研究所采用的 Ce: GAGG+SiPM 技术路线。从核心器件选型角度来看，本系统在规模化生产条件下具备更明显的成本优化潜力。

## 5 总结

本文提出并研制了一种基于自准直成像思想、用于放射引导的术中手持伽马相机，该相机由闪烁晶体和玻璃在三维空间中交错排列组成探测器，实现无需机械准直器的有效自准直成像。

经实验测量，该相机在距离探测器30～100 mm的100 mm×100 mm的视野内的探测效率为（7.55±2.97）×$10^3$ cps/MBq；在距离探测器5 cm的位置分辨率为4 mm，在距离探测器10 cm的位置分辨率为10 mm；对模拟淋巴结成像场景的球形放射源进行成像定位，在3个维度上的定位偏差均小于2 mm；在放射性活度显著低于临床术中典型水平的小鼠前哨淋巴结成像中，该术中手持伽马相机仍能够实现对前哨淋巴结的清晰成像与准确定位。

综上所述，基于自准直成像思想的术中手持伽马相机在轻量化、高性能、低剂量成像等方面展现出明显优势，在放射引导手术中具有巨大的应用潜力。

## [ 参 考 文 献 ]


[1] Van Oosterom M N, Rietbergen D D D, Welling M M, et al. Recent advances in nuclear and hybrid detection modalities for image-guided surgery [J]. Expert Rev Med Devices, 2019, 16(8): 711-734.

[2] Mariani G, Moresco L, Viale G, et al. Radioguided sentinel lymph node biopsy in breast cancer surgery [J]. Journal of Nuclear Medicine, 2001, 42(8): 1198-1215.

[3] Mariani G, Gipponi M, Moresco L, et al. Radioguided sentinel lymph node biopsy in malignant cutaneous melanoma [J]. Journal of Nuclear Medicine, 2002, 43(6): 811-827.

[4] Bitencourt A G V, Lima E N P, Pinto P N V, et al. New applications of radioguided surgery in oncology [J]. Clinics (Sao Paulo), 2009, 64(5): 397-402.

[5] Bogalhas F, Menard L, Bonzom S, et al. Physical performance of an intraoperative beta probe dedicated to glioma radioguided surgery [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(3): 833-841.

[6] Olcott P, Pratx G, Johnson D, et al. Clinical evaluation of a novel intraoperative handheld gamma camera for sentinel lymph node biopsy [J]. Physica Medica, 2014, 30(3): 340-345.

[7] Knoll P, Mirzaei S, Schwenkenbecher K, et al. Performance evaluation of a solid-state detector based handheld gamma camera system [J]. Frontiers Biom Technol, 2014, 1(1): 61-67.

[8] Lees J E, Bassford D J, Blake O E, et al. A high resolution Small Field Of View (SFOV) gamma camera: a columnar scintillator coated CCD imager for medical applications [J]. Journal of Instrumentation, 2011, 6(12): C12033.

[9] Fan P, Ma T, Wei Q, et al. Choice of crystal surface finishing for a dual-ended readout depth-of-interaction (DOI) detector [J]. Phys Med Biol, 2016, 61(3): 1041-1056.

[10] Zhu X, Deng Z, Chen Y, et al. Development of a 64-channel readout ASIC for an 8×8 SSPM array for PET and TOF-PET applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(3): 1327-1334.

[11] Ma T, Wei Q, Lyu Z, et al. Self-collimating SPECT with multi-layer interspaced mosaic detectors [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2021, 40(8): 2152-2169.

[12] Lange K, Carson R. EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography [J]. J Comput Assist Tomogr, 1984, 8(2): 306-316.

[13] Kogler A K, Polemi A M, Nair S, et al. Evaluation of camera-based freehand SPECT in preoperative sentinel lymph node mapping for melanoma patients [J]. EJNMMI Research, 2020, 10(1): 139.

[14] Bugby S L, Farnworth A L, Brooks W R, et al. Seracam: characterisation of a new small field of view hybrid gamma camera for nuclear medicine [J]. EJNMMI Physics, 2024, 11(1): 57.

[15] Mahieu R, Tijink B M, van Es R J J, et al. The potential of the Crystal Cam handheld gamma-camera for preoperative and intraoperative sentinel lymph node localization in early-stage oral cancer [J]. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2023, 280(12): 5519-5529.

[16] Pashazadeh A, Fomanka Lauretta N, Boese A, et al. Hybrid handheld gamma-ultrasound prototype for radioguided surgery: initial results [J]. Current Directions in Biomedical Engineering, 2021, 7(2): 140-142.

[17] 王雪鹃, 杨志, 林保和, 等. 前哨淋巴结显像剂 $^{99}Tc^m$-IT-Rituximab的制备及其定位性能 [J]. 中华核医学杂志, 2006, 26(4): 226-230.

[18] 李洪玉, 梁积新, 罗洪义, 等. $^{99}Tc^m$-硫化锑胶体用于前哨淋巴结检测的生物实验：注射剂量与明胶浓度的影响 [J]. 同位素, 2011, 24(2): 72-76.

[19] Wallace A M, Hoh C K, Limmer K K, et al. Sentinel lymph node accumulation of Lymphoseek and Tc-99m-sulfur colloid using a "2-day" protocol [J]. Nucl Med Biol, 2009, 36(6): 687-692.