

Progresses of integrated PET/MR imaging

YUAN Zengbei, ZHAO Jun*

(Department of Nuclear Medicine, Shanghai East Hospital, Tongji University, Shanghai 200120, China)

[Abstract] Being one of research hotspots in recent years, PET/MR has higher sensitivity and specificity than PET/CT and brings precision medicine based on molecular imaging into a new era. The progresses including improving integrated PET/MR imaging structures, optimizing imaging and combining with artificial intelligence were reviewed in this article.

[Keywords] positron-emission tomography; magnetic resonance imaging; artificial intelligence

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.031

一体化 PET/MR 成像进展

袁增贝, 赵 军*

(同济大学附属东方医院核医学科, 上海 200120)

[摘要] PET/MR 敏感度与特异度高于 PET/CT, 已成为近年研究热点之一, 并使基于分子影像学技术的精准医疗跨入了新时代。本文围绕改进一体化 PET/MR 结构、优化成像及与人工智能相结合等进展进行综述。

[关键词] 正电子发射断层显像; 磁共振成像; 人工智能

[中图分类号] R817.4; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2024)05-0783-04

随着医学成像技术的迅速发展, 利用影像学检查可在直观显示正常组织器官及异常病变的基础上进一步挖掘机体功能、代谢、乏氧、受体及基因表达等多种信息, 因此, 一体化成像设备越来越受到关注^[1]。PET 可利用正电子核素示踪剂精准观察组织代谢, 其灵敏度高且具有分子靶向性^[2]; 结合 MRI 可获得更高的空间分辨率及高软组织对比度的图像, 在诊断和鉴别多种良、恶性肿瘤, 神经及心血管系统疾病, 以及评估疗效等方面具有显著优势^[3], 尤其适用于儿童。本文就一体化 PET/MR 结构设计、成像优化及其与人工智能 (artificial intelligence, AI) 相结合等进展进行综述。

1 改进结构

PET/MR 整体框架结构历经双机房分体扫描、单机房分体扫描及集成一体化同步扫描 3 个发展阶

段^[4]。双机房分体扫描由分置于相邻机房的 PET/CT 及 MR 设备独立完成; 单机房分体扫描指通过移动扫描床使受检者于同一机房内先后完成 PET 及 MR 扫描; 集成一体化同步扫描则将 PET 探测器与 MR 线圈整合于一体化 PET/MR 设备中, 在真正意义上实现了 PET 与 MR 同时间、同空间成像。

一体化 PET/MR 设备的结构包括分离式、嵌入式及插入式。分离式多指直接将 PET 探测器置于 MR 设备中, 通过光纤引出 PET 信号并进行处理; 嵌入式通过将 PET 探测器嵌入重新设计后的 MR 体线圈内进行成像; 插入式指将 PET 探测器置于 2 组独立的 MR 梯度线圈之间进行同步成像。目前主流 PET/MR 设备如联影 uPMR 790、GE Signa PET/MR 及 Siemens Biograph mMR 等, 均为一体化设计, 其核心参数见表 1。

[基金项目] 上海市浦东新区卫生系统重点学科建设项目 (PWZxk2022-12)。

[第一作者] 袁增贝 (1998—), 男, 安徽六安人, 硕士, 技师。研究方向: 核医学图像处理。E-mail: ahmuyuanzengbei@163.com

[通信作者] 赵军, 同济大学附属东方医院核医学科, 200120。E-mail: petcenter@126.com

[收稿日期] 2024-01-25 **[修回日期]** 2024-02-22

表 1 一体化 PET/MR 设备核心参数

设备名称	PET 参数								
	晶体尺寸(mm)	晶体类型	晶体环数(个)	晶体数量(个)	探测器	灵敏度(cps/kBq)	轴向视野(mm)	最大扫描范围(cm)	TOF 时间分辨率(ps)
联影 uPMR 790	2.76×2.76×15.50	LYSO	112	78 400	SiPM	16.0	320	≥180	≤480
GE Signa PET/MR	3.95×5.30×25.00	LBS	45	20 160	SiPM	21.0	250	≥184	≤385
Siemens Biograph mMR	4.00×4.00×20.00	LSO	64	28 672	APD	14.1	258	≥200	—

设备名称	MR 参数						
	孔径(cm)	磁体场强(T)	最大扫描视野(cm)	射频发射功率(kW)	最高梯度切换率(mT/m/ms)	最大单轴梯度场强(mT/m)	独立射频发射数/接收通道数(个)
联影 uPMR 790	60	3.0	50	≥18	≥200	50	2/48
GE Signa PET/MR	60	3.0	50	≥30	≥200	44	2/32
Siemens Biograph mMR	60	3.0	50	≥35	≥200	45	2/32

注:TOF:飞行时间(time of flight);LYSO:硅酸铈镧晶体(lutetium yttrium orthosilicate);LBS:镧基闪烁晶体(lutetium based scintillator);LSO:硅酸镧晶体(lutetium oxyorthosilicate);SiPM:硅光电倍增管(silicon photomultiplier tube);APD:雪崩光电二极管(avalanche photo diode)

近年利用多种微米级厚度的铜制屏蔽壳有效解决了以往困扰一体化 PET/MR 设备的射频干扰问题。研究^[5]报道,以高电阻率碳纤维材料制造的屏蔽壳可保持导电性而几乎不影响成像过程。PET 探测器中的光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)对 MR 磁场较敏感^[6]。Siemens 团队采用不受 MR 磁场干扰的 APD 替代传统 PMT^[7];GE 及联影团队均以 SiPM 作为 PET 输出部件,不仅能保证良好的磁场稳定性及较高时间分辨率^[8],还可支持 TOF 技术。

2 优化成像

2.1 衰减校正(attenuation correction, AC)

AC 可通过估测组织衰减系数修正组织密度及相对分布差异引发的射线衰减对 PET 成像的影响^[9]。目前 PET/MR 所用 AC 方法包括直接测量法和间接计算法,前者基于体外放射源直接重建获得目标区域衰减图,后者利用已知成像信息以区域分割法、图谱配准法、透射扫描法及发射数据重建法预估衰减图^[10]。

区域分割法通常基于 MRI、尤其是解剖信息丰富的 T1WI,根据目标区域的衰减特性划分不同组织,并赋予其 511 keV 所对应的衰减系数校正 PET 图像^[11],适用于 MRI 信号相似但衰减系数存在显著差异的区域。图谱配准法基于 MR 模板及来源于多组投射图像平均值的 PET 衰减图像模板,通过配准图像模板与采集的目标图像、依据组织成分差异信息生成相应衰减图^[12],可根据模板来源分为地图集法(预先构建的人类组织模板图像数据库)与模板法(已知组织密度模板及其对应的衰减系数参考值)。透射扫描法

利用 PET/MR 设备的放射性部件同时采集图像并获得目标区域发射与透射图像,不依赖 MRI,但设备需具备 TOF 技术。发射数据重建法可直接通过算法以 PET 数据重建目标区域衰减图像,但操作复杂使其临床应用受限。

2.2 运动校正

PET/MR 成像过程中,人体正常生理活动产生的运动伪影可致图像对比度及信噪比降低,从而使微小病灶边界模糊^[13-15]。运动校正图像有利于获取受检者精准运动信息以提高图像质量,可大致分为基于硬件与软件两类方法。基于硬件的运动校正指以专用设备对目标进行附加标记并获取精确运动数据,常见设备包括呼吸门控及心电监控设备^[16-17];基于软件的运动校正则通过对 PET 数据进行后处理而纠正运动伪影,如图像配准法可连续采集多帧图像,并将不同时间点 PET 图像与目标区域的参考位置进行配准,进而通过评估各帧图像的运动信息而实现运动校正。临床可根据目标区域运动程度及成像需求选择配准算法。

2.3 散射校正

散射指 PET 成像时光子与组织中的物质相互作用并改变方向的现象,可致图像伪影;现有常用校正方法包括能窗法、卷积法、物理模型法及 AI 模型法^[18]。能窗法通过适当选择能量窗口获取散射事件数据并建立散射模型,最终实现散射校正;卷积法应用卷积核建立散射分布模型,并于重建图像过程中纳入散射校正因子进行散射校正;以单散射模拟为代表的物理模型法通过模拟单一散射事件并将其集成至重建图像中而完成散射校正^[19];AI 模型法则仅基于

核素与组织物质的空间分布信息对模型进行优化训练,最终可输出与物理模型法效果相当的散射分布估计结果。

2.4 快速扫描 相比 PET/CT, PET/MR 成像时间较长、检查效率相对低、患者舒适度欠佳;目前研究人员致力于通过调整 MR 序列而在不影响成像质量的前提下缩短采集时间。KIRCHNER 等^[20]指出,为实现精准、快速 PET/MR 成像,可保留用于衰减校正的 T1W 及提供高分辨率信息的 T2W 而去除仅提供冗余及对比信息的序列,同时针对特定区域进行可选序列扫描。

3 与 AI 相结合

相比传统核医学采集及处理图像方法,训练优化后的 AI 模型通常能更迅速、高效地完成特定任务而大幅提升图像质量,在推动核医学成像技术进步和促进精准医学发展方面展现出巨大应用潜力^[21-22]。

3.1 AI 用于采集图像 既往研究^[23]基于以大量数据训练后的机器学习(machine learning, ML)模型将标准解剖学模板映射至特定 PET/MRI,以实现个体化 AC。深度学习(deep learning, DL)模型已广泛用于训练映射关系,训练优化后可基于 MRI 预测目标区域衰减图像。受解剖异质性及个体差异等影响,直接实现全身 PET/MR AC 的难度较高,目前以 AI 模型进行 AC 仅限于头部,但已有学者^[24-26]通过构建卷积神经网络证实了将 DL 模型用于头部以外区域 AC 的可行性。

3.2 AI 用于重建图像 重建 PET/MR 图像过程计算密集、复杂,利用 AI 模型可通过学习成像信息与重建图像间的映射关系而辅助图像重建、缩短重建时间,并根据受检者生理特征及临床需求进行自适应重建,有助于实现个性化诊疗^[27];其主要方法包括目标数据驱动下独立构建的 AI 模型、经典物理及统计模型结合 AI 模型及训练优化已知 AI 模型并重建图像^[28]。

3.3 AI 用于图像后处理 AI 模型已用于 CT、MR 等多种医学图像的去噪、提升分辨率等。PET/MR 典型后处理方法是低剂量 PET 图像生成全剂量等效 PET 图像,以降低图像噪声、提高空间分辨率^[29]。目前以 DL 模型为代表的 AI 图像去噪模型主要包括 U-Net、卷积自编码器及生成对抗网络^[30]。AI 模型的另一特点是可于低剂量条件下重建图像。KAPLAN 等^[31]基于 CNN 模型仅以 10% 剂量获得与全剂量质量相当的重建 PET 图像,这对于儿童等特定群体具有重要临床意义。

4 小结与展望

一体化 PET/MR 在提供多模态信息、辅助临床诊疗方面具有独特优势^[32],但存在扫描较为耗时且图像伪影干扰等问题;未来需进一步完善成像技术,以支持精准临床诊断。随着软、硬件的迭代更新,一体化 PET/MR 将作为多功能、全面、可靠的成像技术,可提供高质量融合图像,为多领域临床研究提供独特且有价值的视角。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:袁增贝查阅文献、撰写和修改文章;赵军指导、经费支持。

[参考文献]

- [1] LIU H, WANG R, GAO H, et al. Nanoprobes for PET/MR imaging[J]. *Advanced Therapeutics*, 2023, 7(2):2300232.
- [2] WANG H, HUANG Z, ZHANG Q, et al. Technical note: A preliminary study of dual-tracer PET image reconstruction guided by FDG and/or MR kernels [J]. *Med Phys*, 2021, 48(9): 5259-5271.
- [3] 覃春霞,张永学,汪朝晖,等.一体化 PET/MR 用于缺血性心脏病进展[J]. *中国医学影像技术*, 2021, 37(5):768-771.
- [4] HU Z, YANG W, LIU H, et al. From PET/CT to PET/MRI: Advances in instrumentation and clinical applications [J]. *Mol Pharm*, 2014, 11(11):3798-3809.
- [5] ZENG T, ZHENG J, XIA X, et al. Design and system evaluation of a dual-panel portable PET (DP-PET) [J]. *EJNMMI Phys*, 2021, 8(1):47.
- [6] JIANG W, CHALICH Y, DEEN M J. Sensors for positron emission tomography applications [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(22):5019.
- [7] LIU J, GENG J. Recent progress on imaging technology and performance testing of PET/MR [J]. *Radiat Detect Technol Methods*, 2023, 7:84-89.
- [8] LECOQ P, GUNDAKER S. SiPM applications in positron emission tomography: Toward ultimate PET time-of-flight resolution [J]. *Eur Phys J*, 2021, Plus 136:292.
- [9] TORRADO-CARVAJAL A. Importance of attenuation correction in PET/MR image quantification: Methods and applications [J]. *Rev Esp Med Nucl Imagen Mol (Engl Ed)*, 2020, 39(3): 163-168.
- [10] KROKOS G, MacKEWN J, DUNN J, et al. A review of PET attenuation correction methods for PET-MR [J]. *EJNMMI phys*, 2023, 10(1):52.
- [11] ARABI H, ZAIDI H. MRI-guided attenuation correction in torso PET/MRI: Assessment of segmentation-, atlas-, and deep learning-based approaches in the presence of outliers [J]. *Magn Reson Med*, 2022, 87(2):686-701.

- [12] CATANA C. Attenuation correction for human PET/MRI studies[J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65(23):23TR02.
- [13] SERRANO-SOSA M, HUANG C. Motion correction in PET/MRI[M]. Franceschi: Springer, Cham, 2021.
- [14] MUNOZ C, ELLIS S, NEKOLLA S G, et al. MRI-guided motion-corrected PET image reconstruction for cardiac PET-MRI[J]. *J Nucl Med*, 2021, 62(12):1768-1774.
- [15] MEINDERS S. Motion corrected abdominal PET/MRI using MR-based motion tracking[D]. Utrecht: Utrecht University, 2022.
- [16] LI H, MENG X, GUAN X, et al. Clinical evaluation of MR-gated respiratory motion correction in simultaneous PET/MRI[J]. *Clin Nucl Med*, 2021, 46(4):297-302.
- [17] SHI L, LU Y, DVORNEK N, et al. Automatic inter-frame patient motion correction for dynamic cardiac PET using deep learning[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(12):3293-3304.
- [18] TEUHO J, TORRADO-CARVAJAL A, HERZOG H, et al. Magnetic resonance-based attenuation correction and scatter correction in neurological positron emission tomography/magnetic resonance imaging: Current status with emerging applications[J]. *Front Phys*, 2019, 7:243.
- [19] WATSON C C, HU J, ZHOU C. Extension of the SSS PET scatter correction algorithm to include double scatter[C]. Australia, 2018. doi: 10.1109/NSSMIC.2018.8824475. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8824475>
- [20] KIRCHNER J, SAWICKI L M, SUNTHARALINGAM S, et al. Whole-body staging of female patients with recurrent pelvic malignancies: Ultra-fast ¹⁸F-FDG PET/MRI compared to ¹⁸F-FDG PET/CT and CT[J]. *PloS one*, 2017, 12(2):e0172553.
- [21] MATSUBARA K, IBARAKI M, NEMOTO M, et al. A review on AI in PET imaging[J]. *Ann Nucl Med*, 2022, 36(2):133-143.
- [22] HELLWIG D, HELLWIG N C, BOEHNER S, et al. Artificial intelligence and deep learning for advancing PET image reconstruction: State-of-the-art and future directions[J]. *Nuklearmedizin*, 2023, 62(6):334-342.
- [23] MECHETER I, ALIC L, ABBOD M, et al. MR image-based attenuation correction of brain PET imaging: Review of literature on machine learning approaches for segmentation[J]. *J Digit Imaging*, 2020, 33(5):1224-1241.
- [24] BRADSHAW T J, ZHAO G, JANG H, et al. Feasibility of deep learning-based PET/MR attenuation correction in the pelvis using only diagnostic MR images[J]. *Tomography*, 2018, 4(3):138-147.
- [25] NIE D, TRULLO R, LIAN J, et al. Medical image synthesis with deep convolutional adversarial networks[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018, 65(12):2720-2730.
- [26] LAURENT B, BOUSSE A, MERLIN T, et al. PET scatter estimation using deep learning U-Net architecture[J]. *Phys Med Biol*, 2023, 68(6).doi: 10.1088/1361-6560/ac9a97.
- [27] ZAHARCHUK G, DAVIDZON G. Artificial intelligence for optimization and interpretation of PET/CT and PET/MR images[J]. *Semin Nucl Med*, 2021, 51(2):134-142.
- [28] READER A J, PAN B. AI for PET image reconstruction[J]. *Br J Radiol*, 2023, 96(1150):20230292.
- [29] READER A J, CORDA G, MEHRANIAN A, et al. Deep learning for PET image reconstruction[J]. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci*, 2021, 5(1):1-25.
- [30] KAUR A, DONG G. A complete review on image denoising techniques for medical images[J]. *Neural Process Let*, 2023, 55:7807-7850.
- [31] KAPLAN S, ZHU Y M. Full-dose PET image estimation from low-dose PET image using deep learning: A pilot study[J]. *J digit Imaging*, 2019, 32(5):773-778.
- [32] 祝安惠, 张燕燕. 一体化 PET/MR 应用进展[J]. *中国介入影像与治疗学*, 2018, 15(1):51-54.