

· 综述 ·

Application progresses of integrated PET/MR

ZHU Anhui, ZHANG Yanyan*

(Department of Nuclear Medicine, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China)

[Abstract] Integrated PET/MR has many advantages, including functional imaging of PET, precise positioning and multi-parameter imaging of MR. With the improvement of image reconstruction, attenuation correction and artifact control technology, the scanning time of PET/MR has further shortened, the radiation dose has further reduced, and the application in clinical and scientific research field has further broadened. The application progresses of integrated PET/MR were reviewed in this article.

[Key words] Positron-emission tomography; Magnetic resonance imaging

DOI:10.13929/j.1672-8475.201711046

一体化 PET/MR 应用进展

祝安惠, 张燕燕*

(北京大学第三医院核医学科, 北京 100191)

[摘要] 一体化 PET/MR 具有 PET 功能成像和 MR 精准定位及多参数成像的优势。随着图像重建、衰减校正及伪影控制技术的提高, 一体化 PET/MR 扫描时间逐步缩短, 辐射剂量降低, 在临床及科研中的应用领域进一步拓宽。本文对一体化 PET/MR 的应用进展进行综述。

[关键词] 正电子发射断层显像术; 磁共振成像

[中图分类号] R445.2; R817.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-8475(2018)01-0051-04

PET/MR 是将 PET 和 MR 融为一体的影像学检查手段。PET/MR 集 PET 功能成像和 MR 精准定位及多参数成像等优势于一体, 随着图像重建、衰减校正及伪影控制技术的提高, 其扫描时间逐步缩短, 辐射剂量进一步降低, 在临床及科研中的应用领域逐年拓宽^[1]。本文对一体化 PET/MR 的应用进展进行综述。

1 概述

随着影像融合技术的不断进步, PET/MR 成像设备已由传统的分体式发展成为一体机, 其构造及性能

显著提升, 克服了分体式 PET/MR 检查过程耗时长及无法实现同时扫描的不足。一体化 PET/MR 系统设计分为插入式、嵌入式及完全集成式 3 种方式^[2]。①插入式: 将 PET 探测器简单插入 MR 设备, 但 PET 与 MR 信号相互干扰程度较大, 导致 PET 性能下降; ②嵌入式: 将 PET 探测器置于 MR 发射线圈内, 可实现同步扫描, 但也导致 MR 孔径明显变小而仅可用于小动物或人体头部和四肢; ③完全集成式: 将 PET 探测器置入 MR 梯度线圈内, 可节省磁体占据的空间, 同时显著降低 PET 与 MR 互相干扰, 使 PET 性能显著提高, 可实现飞行时间(time of flight, TOF)技术, 真正实现 PET 与 MR 等中心、相同容积和同步扫描, 使 PET/MR 整体扫描时间明显缩短^[3]。

1.1 硬件技术 影响一体化 PET/MR 性能的硬件技术主要为 PET 光电转换器、MR 线圈性能及连续床位移动技术等。PET 光电转换器有光电倍增管(photo-multiplier tubes, PMT)、雪崩光电二极管(avalanche

[基金项目] 2016 年国家科技部数字化诊疗装备研究试点专项(2016YFC0104005)。

[第一作者] 祝安惠(1976—), 女, 四川冕宁人, 博士, 副主任医师。研究方向: 肿瘤影像学。E-mail: zhuanhui718@sina.com

[通信作者] 张燕燕, 北京大学第三医院核医学科, 100191。

E-mail: nmyy@vip.163.com

[收稿日期] 2017-11-07 [修回日期] 2017-12-15

photo diode, APD) 和硅光电倍增管 (silicon photo-multipliers, SiPM)。PMT 对磁场敏感而不适用于 PET/MR 设备; APD 对磁场不敏感, 但噪声较大而导致能量和时间分辨率下降, 在一体化 PET/MR 设备中已逐渐被 SiPM 取代。SiPM 的光电转化率、时间和空间分辨率均较 APD 高, 且工作电压低而增益高, 可实现高度集成化, 进一步提高 PET 的整体性能^[4]。目前基于 SiPM 的 TOF 时间分辨率已提高至 400 ps 以内^[5]。MR 采用一体化相控阵表面线圈, 配合连续床位移动技术, 一次采集可同时获得全高分辨率图像及 T1W、T2W、质子加权和 DWI 等多序列图像, 扫描速度明显提高^[1]。

1.2 软件技术 为提高 PET 图像信噪比和对小病灶的检出率, 一体化 PET/MR 软件技术的突破点主要在于图像重建和衰减校正方法。PET 采用点扩展函数 (point spread function, PSF) 重建方法, 可获得亚毫米分辨率。有学者^[6]发现, 对于最大径 < 10 mm 的病灶, TOF 联合 PSF 重建方法获得的标准摄取平均值和最大值均较单独使用 TOF 或 PSF 提高, 提示基于 TOF 联合 PSF 重建方法的一体化 PET/MR 有利于检出最大径 < 10 mm 的病灶。TOF 技术可提高扫描速度及 PET 图像对比度, 从而降低示踪剂用量^[4]、提高图像质量^[7]。

一体化 PET/MR 采用 MR 信息对 PET 图像进行衰减校正 (MR attenuation correction, MRAC)^[8], 包括提高组织分类、恢复人体轮廓和提高衰减校正图的准确性。准确地组织分类是精确计算衰减校正系数图的前提, 目前 MR 通过水脂分离序列、图集技术及零回波技术可获得 5 种组织分类 (气体、水、脂肪、软组织和骨骼), 联合应用上述技术可显著提高 MRAC 的可靠性、可重复性和准确性^[9]。

1.3 伪影校正 一体化 PET/MR 伪影校正主要针对运动伪影及金属植入物相关伪影。PET 和 MR 运动伪影校正技术可启动 PET 与 MR 同步扫描, 包括外置门控 (如呼吸、心电和指脉信号等) 和 MR 自身导航技术。一体化 TOF PET/MR 不增加扫描时间即可提供与呼吸周期不同时相匹配的 MRAC 校正技术, 可明显减少由呼吸运动导致的图像不匹配伪影, 从而显著提高胸腹部图像质量^[10]。TOF 技术还可补偿金属植入物所致的 PET 信息丢失, 提高 MRAC 的精确性^[11]。

2 应用进展

2.1 肿瘤

2.1.1 肺癌 一体化 TOF PET/MR 的亚毫米级时

间分辨力能有效消除运动伪影、显著提高图像分辨力。研究^[12]表明, 一体化 TOF PET/MR 能有效检出肺部病变, 可应用于肺癌的临床分期。

2.1.2 乳腺癌 乳腺钼靶和超声难以判断致密腺体中可能存在的肿块。MR 具有优越的软组织分辨力, 可准确检出此类病变, 且在显示乳腺癌胸壁侵犯方面具有明显优势。有研究^[13-14]报道, 俯卧位 PET/MR 乳腺成像中, 双乳处于下垂状态, 所提供的病变代谢、解剖细节及功能参数方面的信息均优于常规仰卧位 PET/MR 成像。

2.1.3 腹部及盆腔肿瘤 PET/MR 有利于检出高分化肝癌、胃肠道神经内分泌肿瘤、女性生殖系统原发性肿瘤、转移病变及腹腔小淋巴结^[15], 还可准确评估胰腺癌的侵犯范围。有学者^[1]采用¹¹C 或¹⁸F 标记胆碱或⁶⁸Ga-PSMA, 发现 PET/MR 能清晰显示前列腺癌原发病灶的解剖细节, 有助于指导穿刺活检。

2.1.4 神经系统肿瘤 PET/MR 可获得病变的精细解剖细节及代谢信息, 还可通过 MR 扩散张量成像、DWI、MRS 等多参数成像获得肿瘤侵犯神经纤维束、肿瘤内部微环境变化及肿瘤化学成分变化的相关信息^[16], 在手术或活检前精确定位肿瘤方面具有重要意义。

2.1.5 淋巴瘤 MR 具有优越的软组织分辨率, 不仅可发现局限在淋巴结的病变, 还可有效检出骨髓、肌肉、腹部及盆腔脏器等的微小浸润灶。由于 MR 无辐射, 适宜放疗后再分期、疗效评估和远期随访, 尤其是对射线敏感的儿童患者, 更是理想的选择^[17]。

2.1.6 骨转移瘤 MR 快速自旋回波 T1WI 或 Dixon 同相位 T1WI 对骨髓浸润病变非常敏感, 有助于检出早期骨转移瘤, 同时可用于评估骨转移瘤放化疗疗效^[18]。

2.2 非肿瘤病变

2.2.1 神经系统 一体化 TOF PET/MR 可提供脑组织精细化的解剖结构、脑血流量及脑功能等多方面的信息, 实现 PET 绝对定量脑血流量, 在早期诊断脑疾病 (如脑血管病、痴呆、帕金森病及癫痫等) 导致的脑血流量异常及预后判断中发挥重要作用^[19]。Su 等^[20]发现, 采用¹⁵O-PET 图像衍生的动脉输入技术, PET/MR 可绝对定量脑血流动力学参数 (如脑血流量、血容量及脑氧代谢率), 且准确性与传统侵入性动脉血采样法相同, 操作简单, 可重复性强。一体化 PET/MR 能识别脑缺血时发生无氧糖酵解的组织, 可用于观察缺血后神经炎症导致神经破坏和修复发生的机制。

Lewis 等^[21]采用一体化⁵²Mn PET/MR 检查小鼠神经干细胞,为未来临床研究神经干细胞治疗技术及治疗策略提供影像学依据。

2.2.2 心血管系统 PET/MR 辐射剂量低,具备良好的运动伪影矫正方法,同时心脏 MR 可提供精细的形态学信息,因此 PET/MR 在评价冠状动脉不稳定斑块、心功能、心肌灌注、心肌存活及心肌病等方面具有重要作用,有望成为心血管疾病的常规检查方法^[22]。Robson 等^[23]采用自由呼吸衰减矫正成像方法和增加迭代次数的重建方法,应用¹⁸F-FDG 和¹⁸F-NaF 两种显像剂,获得冠状动脉炎症活动和微钙化的低剂量(7.2 mSv)PET/MR 图像。新型示踪剂¹⁸F-galactose-RGD 可用于评估冠状动脉斑块炎症及再生血管。

3 技术挑战与展望

有学者^[24]提出,MR 不同序列检测肺部病变的效能不同,故优化 MR 采集序列可提高 PET/MR 的检测效能。多项研究^[25-26]显示,ADC 值和 SUV 值是诊断宫颈鳞癌的独立指标,以 ADC 值评价恶性程度分级较 SUV 值更敏感,提示以 DWI 作为 PET/MR 常规扫描序列可为诊断及制定放疗计划提供参考信息。国内已有学者制定了神经系统 PET/MR 检查规范^[27]及护理流程^[28],但国内一体化 PET/MR 应用尚处于起步阶段,仍需进一步规范扫描方案。

PET 主要采用¹⁸F-FDG 为探针,¹⁸F-FDG 在多数恶性肿瘤中均表现为不同程度摄取增高。MR 可通过多参数和多序列扫描来提高组织分辨率。采用¹⁸F-FDG 可能导致漏检¹⁸F-FDG 摄取阴性或 MRI 常规成像缺乏良好对比的病变或组织,故研制既适用于 MR 又适用于 PET 的新型探针,将有助于进一步拓宽 PET/MR 的应用范围。

[参考文献]

- [1] Spick C, Herrmann K, Czernin J. ¹⁸F-FDG PET/CT and PET/MRI perform equally well in cancer: Evidence from studies on more than 2,300 patients. *J Nucl Med*, 2016, 57(3):420-430.
- [2] Delso G, Ziegler S. PET/MRI system design. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2009, 36(Suppl 1):S86-S92.
- [3] Levin CS, Maramraju SH, Khalighi MM, et al. Design features and mutual compatibility studies of the time-of-flight PET capable GE SIGNA PET/MR system. *IEEE Trans Med Imaging*, 2016, 35(8):1907-1914.
- [4] Oehmigen M, Ziegler S, Jakoby BW, et al. Radiotracer dose reduction in integrated PET/MR: Implications from National Electrical Manufacturers Association phantom studies. *J Nucl Med*, 2014, 55(8):1361-1367.
- [5] Grant AM, Deller TW, Khalighi MM, et al. NEMA NU 2-2012 performance studies for the SiPM-based ToF-PET component of the GE SIGNA PET/MR system. *Med Phys*, 2016, 43(5):2334.
- [6] Shang K, Cui B, Ma J, et al. Clinical evaluation of whole-body oncologic PET with time-of-flight and point-spread function for the hybrid PET/MR system. *Eur J Radiol*, 2017, 93(8):70-75.
- [7] Kolb A, Sauter AW, Eriksson L, et al. Shine-through in PET/MR imaging: Effects of the magnetic field on positron range and subsequent image artifacts. *J Nucl Med*, 2015, 56(6):951-954.
- [8] Leynes AP, Yang J, Shanbhag DD. Hybrid ZTE/dixon MR-based attenuation correction for quantitative uptake estimation of pelvic lesions in PET/MRI. *Med Phys*, 2017, 44(3):902-913.
- [9] Sekine T, Burgos N, Warnock G, et al. Multi-atlas-based attenuation correction for brain ¹⁸F-FDG PET imaging using a time-of-flight PET/MR scanner: Comparison with clinical single-atlas and CT-based attenuation correction. *J Nucl Med*, 2016, 57(8):1258-1264.
- [10] Delso G, Khalighi M, Ter Voert E, et al. Effect of time-of-flight information on PET/MR reconstruction artifacts: Comparison of free-breathing versus breath-hold MR-based attenuation correction. *Radiology*, 2017, 282(1):229-235.
- [11] Defrise M, Rezaei A, Nuyts J. Time-of-flight PET data determine the attenuation sinogram up to a constant. *Phys Med Biol*, 2012, 57(4):885-899.
- [12] Minamimoto R, Iagaru A, Jamali M, et al. Conspicuity of malignant lesions on PET/CT and simultaneous time-of-flight PET/MRI. *PLoS One*, 2017, 12(1):e0167262.
- [13] Schaarschmidt BM, Grueneisen J, Metzenmacher M, et al. Thoracic staging with ¹⁸F-FDG PET/MR in non-small cell lung cancer-does it change therapeutic decisions in comparison to ¹⁸F-FDG PET/CT? *Eur Radiol*, 2017, 27(2):681-688.
- [14] Cho IH, Kong EJ. Potential clinical applications of ¹⁸F-Fluorodeoxyglucose positron emission tomography/magnetic resonance mammography in breast cancer. *Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 51(3):217-226.
- [15] Oprea-Lager DE, Yaqub M, Pieters IC, et al. A clinical and experimental comparison of time of flight PET/MRI and PET/CT systems. *Mol Imaging Biol*, 2015, 17(5):714-725.
- [16] Heiss WD. Hybrid PET/MR imaging in neurology: Present applications and prospects for the future. *J Nucl Med*, 2016, 57(7):993-995.
- [17] Afaq A, Fraioli F, Sidhu H, et al. Comparison of PET/MRI with PET/CT in the evaluation of disease status in lymphoma. *Clin Nucl Med*, 2017, 42(1):e1-e7.
- [18] Eiber M, Takei T, Souvatzoglou M, et al. Performance of whole-body integrated ¹⁸F-FDG PET/MR in comparison to PET/CT for evaluation of malignant bone lesions. *J Nucl Med*, 2014, 55(2):191-197.
- [19] 单艺, 卢洁, 李坤成. 一体化 PET/MR 评估脑血流量的研究进展. *中国医学影像技术*, 2017, 33(8):1269-1272.

- [20] Su Y, Vlassenko AG, Couture LE, et al. Quantitative hemodynamic PET imaging using image-derived arterial input function and a PET/MR hybrid scanner. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2017, 37(4):1435-1446.
- [21] Lewis CM, Graves SA, Hernandez R, et al. ^{52}Mn production for PET/MRI tracking of human stem cells expressing divalent metal transporter 1 (DMT1). *Theranostics*, 2015, 5(3): 227-239.
- [22] Kero T, Nordström J, Harms HJ, et al. Quantitative myocardial blood flow imaging with integrated time-of-flight PET-MR. *EJNMMI Phys*, 2017, 4(1):1.
- [23] Robson PM, Dweck MR, Trivieri MG, et al. Coronary artery PET/MR imaging: Feasibility, limitations, and solutions. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(10 Pt A):1103-1112.
- [24] Rasmussen JH, Nørgaard M, Hansen AE, et al. Feasibility of multiparametric imaging with PET/MR in head and neck squamous cell carcinoma. *J Nucl Med*, 2017, 58(1):69-74.
- [25] 王鹏远, 辛军, 孙洪赞, 等. ^{18}F -FDG-PET/MR 观察宫颈鳞状细胞癌 ADC 值与 SUV 的相关性. *中国医学影像技术*, 2014, 30(4): 603-607.
- [26] Huellner MW, Appenzeller P, Kuhn FP, et al. Whole-body nonenhanced PET/MR versus PET/CT in the staging and restaging of cancers: Preliminary observations. *Radiology*, 2014, 273(3):859-869.
- [27] 卢洁, 张苗, 方继良, 等. 一体化 PET/MR 颅脑成像检查规范 (2017 版). *中国医学影像技术*, 2017, 33(5):791-794.
- [28] 韩斌如, 帅冬梅, 方继良, 等. 一体化 PET/MR 检查临床护理操作规范 (2017). *中国医学影像技术*, 2017, 33(5):795-798.

《中华介入放射学电子杂志》赠刊、征稿启事

《中华介入放射学电子杂志》(刊号:ISSN 2095-5782, CN 11-9339/R)创刊于 2013 年,由国家卫生计生委主管、中华医学会主办的介入医学专业学术期刊。是中华医学会放射学分会介入学组指定的官方学术刊物。总编辑为单鸿教授,常务总编辑为翟仁友教授,以光盘附纸质导读形式公开发行出版。杂志为季刊,每期 80 页左右,大 16 开本,铜版纸印刷,印刷精良,图片清晰。

本刊主要刊登神经介入、血管介入、肿瘤介入和非血管介入领域的临床及科研新进展,同时涵盖介入护理、介入学科管理及教学、医学影像等方面的研究成果。是广大介入放射工作者展示学术成果、临床经验和学习、交流的平台。

本刊运用丰富的文字、影视语言和全方位的多媒体技术,实现了图文并茂、视频与文本文件相结合。关于介入放射方面的专家论坛、基础与临床研究、短篇论著、个案和综述等,以及手术录像、讲课幻灯均可以投稿。

现我刊特举办免费赠刊活动,赠刊对象可以是科室、图书馆、个人等,免费索取!

请从本刊网站 <http://zhjrfstdzz.paperopen.com>“下载中心”处下载并填写“赠刊索取单”,填好后发至邮箱 zhjrfstd@163.com 即可,本刊收到后会及时回复!

邮编:300190

地址:天津市南开区金平路 10 号 2 楼 204 室

电话:022-87087067

邮箱:zhjrfstd@163.com

网址:www.zhjrfstdzz.paperopen.com