

的辐射剂量。深度学习重建(DLR)是在基于模型的迭代重建(MBIR)重建的高剂量CT图像的训练数据集上训练的深度卷积神经网络。为了减少辐射剂量,研究评估了DLR对腹部U-HRCT图像的影响。该研究对74例经U-HRCT获得的肝脏动态CT扫描进行评价,其中37例采用标准剂量扫描(A组),37例采用70%标准剂量扫描(B组)。用混合IR、MBIR和DLR重建肝动脉(HAP)和平衡期(EP)图像。放射科医生将脊柱旁肌肉衰减的标准差记录为图像噪声。总体图像质量由另外两位放射科医生使用从1(不可接受)到5(优秀)的5分置信等级进行评估。非劣性的定义是使用预先指定的非劣性界限,其中,对于图像噪声,95%CI的上限不超过2.0,并且对于整体图像质量,95%CI的下限小于-1。在该范围内,对于图像噪声,95%CI的上限不超过2.0,对于整体图像质量,95%CI的下限小于-1。结果提示在DLR(95%CI:

-0.97~1.71)、混合IR(95%CI:2.32~5.60)和MBIR(95%CI:-0.62~3.21)图像上,HAP图像噪声无劣化标准。在EP中,B组DLR和MBIR图像的图像噪声不低于A组(DLR 95%CI:0.59~1.86,MBIR 95%CI:-1.13~1.85)。然而,在混合红外图像上,B组不如A组(95%CI:2.75~5.64)。B组HAP(95%CI:-0.74~0.18)和EP(95%CI:-0.85~0.16)的DLR图像质量评分不低于A组,但在HAP的混合IR和MBIR图像上,B组不如A组(混合IR 95%CI:-1.47~-0.44;MBIR 95%CI:-1.82~0.60)。EP图像也是如此(混合IR 95%CI:-1.67~-0.59;MBIR 95%CI:-3.32~-1.03)。因此,DLR即使在降低辐射剂量的情况下也能保持腹部U-HRCT图像的质量。

(收稿日期:2020-01-28)

## • RSNA2020 聚焦 •

# RSNA2020 医学影像技术研究进展

周依然,吴迪,方纪成,刘栋,鲁君,甘桐嘉,刘宇飞,姚义好,张烁琪,陈佳,朱文珍

**【摘要】** 数字化医学影像技术在现代临床疾病的疾病诊断与疗效评价方面发挥着越来越重要的作用,是现代医疗不可或缺的部分。RSNA2020医学影像技术的研究热点主要集中在提高图像质量、降低辐射剂量、联合深度学习算法、开发新技术以及临床相关研究等方面,本文将基于不同影像技术对其领域相关研究进行综述。

**【关键词】** 计算机体层摄影;图像质量;辐射剂量;深度学习;磁共振成像

**【中图分类号】** R814.42;R814.41;R445.2;R-05 **【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1000-0313(2021)03-0315-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.03.007

## 计算机体层摄影(CT)

### 1. 提高图像质量

Wang等在配备双层平板探测器的锥束CT系统上应用了一种新的基于模型的物质分离方法(model-based material decomposition, MBMD),用于高分辨率光谱CT成像。基于双层平板探测器的原型,其顶部为200 μm的碘化铯(CsI)闪烁晶体,采集相对低能量的数据,底部为550 μm的CsI闪烁晶体,采集相对高能量通道的数据。两个通道都采用2880×2880个150 μm的像素组成的非晶硅(a-Si)探测器面板。两层

之间的1 mm铜过滤层提高了光谱分离效率。MBMD方法通过获取特定通道相关的模糊核函数直接估计材料密度分布。将3D打印模型浸入50 mg/mL的碘溶液中,采用滤波反投影法(filtered back projection, FBP)重建的图像域分解法(IDD)、理想模型MBMD(iMBMD)和系统模糊建模MBMD(bMBMD)三种方法测量水和碘的密度体积,发现MBMD法显著降低了噪声,提高了空间分辨率,且bMBMD较iMBMD的效果更好。

传统的快速千伏(kV)切换双能量CT(dual energy computed tomography, DECT)在每个kV时需收集足够的图像,同时要求频繁的kV切换,限制了有效的管电流调试。目前提出了一种用于快速kV切换DECT的级联深度学习重建方法,采用稀疏kV采样切换,减少了对频繁kV切换的依赖,保持图像分辨率,有效地实现数据域物质分离。使用Aquilion ONE

作者单位:430030 武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介:周依然(1995-),男,湖北恩施人,博士研究生,主要从事中枢神经系统影像学研究。

通信作者:朱文珍, E-mail: zhuwenzhen8612@163.com

PRISM 系统采集 kV 切换数据,通过每隔几个视图切换 kV 来实现稀疏 kV 采样,将该方法与采用标准 ADR3D 方法的双旋转 DECT 的结果进行比较。结果表明采用稀疏 kV 切换方法的图像质量与标准方法相似或略有改善。同时在相近辐射剂量水平下,该方法噪声降低 35%,提高了对比度与分辨率。

对去噪框架采用迁移学习算法:通过重复扫描体模噪声叠加到自然图像上以模拟不同剂量水平的 CT 图像,然后训练卷积神经网络(convolutional neural networks,CNN)去除叠加的 CT 噪声并恢复底层的自然图像。该技术在从光子探测计数器(photon counting detector,PCD)CT 扫描仪得到的 5 名患者的 150  $\mu\text{m}$  分辨率胸部 CT 图像进行了测试,对噪声和边缘锐度进行视觉评估。与使用 FBP 和锐度重建核生成的图像相比,CNN 法可降低  $74.2\% \pm 0.2\%$  的噪声,在去噪图像中良好的解剖细节被保留,肩部、骨皮质的尖锐边界也得到很好的维持。该研究开发的 CNN 去噪框架算法提供了广泛的降噪水平,同时保持良好的解剖特征,可广泛应用。

近年来金属伪影消除重建技术已被开发,其在超高分辨率 CT(ultra high resolution CT,UHR-CT)中的应用也已得到证实。通过自制的金属螺栓、金属义齿模型,使用 UHR-CT 和金属伪影消除重建对伪影消除的效果进行了评估,结果表明与常规 CT 相比,UHR-CT 不仅具有较高的空间分辨率,而且具有更好的伪影消除效果。

锥形束 CT(cone beam CT,CBCT)越来越多地用于介入放射学(IR),要求可靠的脉管系统和软组织的可视化,其图像质量面临的挑战包括复杂变形运动和缺乏对比度分辨率。Sisniega 等通过可变形运动补偿和加速的基于模型的迭代重建(model-based iterative reconstruction,MBIR)解决了这些问题。运动破坏重建被输入到一个决策框架,该框架实施了一个深度 CNN(在 105 个模拟运动案例上训练),以估计局部运动幅度,若检测到显著运动,可变形运动补偿由联合自动对焦优化。最后用惩罚加权最小二乘法(penalized weighted least squares,PWLS)重建 CBCT 数据。该方法在 10 例患者中进行了验证,显示可变形运动补偿大大改善了软组织结构和精细脉管系统的可视化,加速后的 PWLS 在约 40 s 内即达到足够的收敛速度(未加速则需 10000 s)。与 FBP 相比,PWLS 图像的软组织对比度提高了约 17%。

基于单色图像的双能谱 CT 在螺旋 CT 尿路造影(CTU)一键快速骨减影中的应用可提高其剪影成功率,以高效率获得高质量的图像。两组 CTU 患者分别接受该方法和常规扫描方式,结果表明在同等辐射

剂量下,120 kV 双能谱 CTU 快速减影成功率明显高于常规 120 kV 图像。双能谱 CTU 的最佳能量水平为 80 kV,其图像质量评分最高。

## 2. 辐射剂量

CT 辐射剂量一直以来都是备受关注的问题,目前已进行了许多关于降低其辐射剂量的研究。预滤主要去除 X 射线光谱中的低能量光子,可减少光束硬化伪影,使患者接受的辐照剂量显著减少。然而由于低能量光子几乎完全被吸收,对图像质量没有贡献,为了达到相似的图像质量,需要随着预滤栅厚度的增加而提升球管功率。Steidel 等的研究表明:增加锡预滤栅厚度可显著增加软组织和碘对比剂的单位剂量对比度噪声比(contrast-to-noise ratios at unit dose,CNRD),0.7 mm 锡预滤栅可减少成人模 30% 的辐射剂量,管电流需增加 7.4 倍。最佳的管电压随患者的体积大小而增加,对于最佳碘 CNRD,锡预滤栅的厚度应适应患者的大小。在功率允许的范围内,选择最厚的预过滤器,则可使软组织 CNRD 最大化。此外,最佳管电压下对不同体模的扫描表明,铜(Cu)预滤栅的效果与锡预滤栅在软组织 CNRD 上无显著差异,而对于碘 CNRD,铜的效果要明显高于锡,在功率允许的范围内,选择铜预滤栅可使碘离子浓度效果最大化,且减少更多的辐射剂量。

通过体模模拟副鼻窦扫描,在 16 cm 宽探测器 CT 扫描仪采用轴向扫描(束宽为 8,12,14,16 cm)和螺旋扫描(束宽 40 mm)两种模式,4 名观察者采用 5 分制独立评估图像质量,并记录辐射使用率与辐射剂量。结果表明,两种扫描方案的图像质量评分未见明显差异(4.29 vs 4.23,  $P=0.69$ ),且相较于螺旋扫描,轴向扫描可提升辐射使用率,在保证图像质量的前提下减少辐射剂量。

用不同体积的生理盐水环绕肺标本模拟不同体型:胖、瘦、正常,在 256 排 CT 扫描仪上扫描,扫描参数:管电压 120 kVp,自动电流,螺距 0.092,Pre-AsiR-V 40%。用不同水平的噪声指数(NI=8、10 和 12)采集图像。记录各组图像噪声(image noise,SD)和有效剂量(effective dose,ED)。主观图像质量由两位放射科医生以双盲随机方式使用 4 分量表进行评估。研究表明当 NI 为 8 时,三组图像的 SD 与图像质量评分均无显著差异,然而体型为瘦和正常的两组 ED 明显降低。说明在在相同的图像噪声水平下,不同大小肺的图像质量无明显差异,而患者横轴面的辐射剂量则明显不同。

患者的体重信息对于 CT 剂量分析必不可少,Saeko 等通过水当量直径(Dw)与扫描长度相乘计算出体重指数(Windex)用于评估 CT 剂量,并在 174 例

接受胸部/腹部/骨盆扫描的患者中进行了验证,发现标准体重的患者(60~69 kg)其 CT 剂量指数(CTDI<sub>v-ol</sub>)和剂量长度乘积(dose length product, DLP)均与 Windex 和体重呈正相关,从而证明对标准体重患者用 Windex 评估 CT 剂量是可行的。

患者大小特定剂量线积分(dose line integral, DLI)被提出作为一种新的度量标准,DLI 图形化的累积剂量分布图能够完整地描述各种患者变量和采集条件下的纵向剂量分布。通过回顾性分析 2013 年—2019 年至少进行了 2 次儿童腹部 CT 扫描的所有患者,比较其 DLI 曲线下面积与 DLP、病例背景 CTDI<sub>v-ol</sub>,发现后两者常常低估了累积辐射剂量。因此,DLI 为 CT 剂量记录提供了有效工具,将能更好地指导剂量优化工作。

Zhang 等将 178 例腹部 CTA 患者前瞻性地分为 3 组:A 组采用 80 和 140 kVp 的快速千伏切换,管电流 195~280 mA,对比剂为 300 mg I/kg。B 组管电压 100 kVp,3D mA 调制,对比剂剂量 300 mg I/kg。C 组管电压 120 kVp,3D mA 调制,对比剂剂量 500 mg I/kg。用 ASiR-V50% 重建图像,A 组用 60 keV 和 70 keV 图像进行分析。结果表明 3 组图像均具有优良的图像质量,各组腹主动脉对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)无明显差异,A、B 两组的 CTDI<sub>v-ol</sub>和总摄碘量相似,但均明显低于 C 组,说明腹部 CTA 采用虚拟单能量成像(virtual monochromatic imaging, VMI)60 keV、70 keV 和 100 kVp 显像在保证图像质量的同时可明显减少辐射剂量和碘摄入量。

Sammer 等通过对 2017 年—2020 年辐射剂量数据进行回顾性分析,按年龄分组。使用描述性统计分别展示透视下食管造影、胸部 CT 和超低剂量 CT 异物检查(ultralow-dose CT for foreign body, CTFB)的辐射分布。对于 1 岁以上的儿童,使用 CTFB 方案的有效辐射剂量最低,而胸部 CT 的有效剂量最高。食管造影的平均辐射剂量差异最大,在大于 5 岁年龄组,食管造影剂量超过 CTFB 的两倍。各年龄组不同检查方式的有效剂量(食管造影、CTFB、胸部 CT)如下:0~1 岁 0.14±0.10、0.35±0.09、1.89±0.54;1~5 岁 0.47±0.37、0.36±0.11、1.71±0.57;5~9 岁 1.08±2.08、0.29±0.05、1.97±0.67;9~13 岁 0.92±0.98、0.31±0.059、2.55±1.62;13~18 岁 1.18±1.24、0.16±0.03、2.98±1.48。

Yang 等对 10 例经平扫发现肺肿物的患者在新一代能谱 CT(Revolution CT, GE Healthcare)进行动脉期(AP)和静脉期(VP)对比增强 CT 扫描。CT 平扫采用 120 kV 管电压和自动管电流,对比增强扫描则用 80/140 kV 快速切换,自动管电流。在图像后处理过

程中获得不同时期的虚拟非对比(VNC)图像。通过对比表明增强肺扫描的 VNC 图像可以作为传统非增强扫描的替代(延迟期虚拟非增强图像质量较其他时期更好),应用于需多次复查的患者可有效降低辐射剂量。

Taniguchi 等开发了三维交叉方向双边滤波器(three-dimensional cross-directional bilateral filter, 3D-CDBF),与常规 FBP 相比,3D-CDBF 在定量和定性图像质量上均有显著改善,且可减少 75% 的辐射剂量,解决了 CBCT 在引导放疗过程中辐射剂量过高的问题。

### 3. 光子计数探测器

探测器是 CT 系统的重要组成部分,光子计数探测器通过对每个光子进行计数,可明显提高图像的 CNR,在 CT 扫描中的应用研究得到了大量开展。虽然用于 CT 的光子计数探测器(photon counting detectors, PCD)具有许多优点,但是其在高通量时存在堆叠效应。Scott 等比较了三种不同的堆叠补偿方法:堆叠触发结构;标准的重触发器结构;由二级计数器改进的重触发器结构。光子入射到单个光子计数探测器像素上,假设其信号随时间的函数为服从泊松统计的高斯响应函数。光子计数探测器使用 5 个间隔 20~100 keV 的接收器,堆叠触发器则采用 130 keV 的接收器。采用克拉美-罗下界(CRLB)评估碘和水基物质图像的方差,并将结果与未加堆叠补偿的光子计数探测器的结果进行对比。结果发现,在低通量时,堆叠补偿电子技术影响不大;在中等通量时,使用标准或改进的重触发器结构,碘基材料标准差降低 45%,而对于堆叠触发器无影响;在高通量时,使用堆叠触发器和标准触发器,标准差降低了 40%,而使用改进的重触发器结构,标准差降低了 70%。因此堆叠补偿电子技术能有效扩展光子计数探测器的有效磁通范围,使用专用的二级计数器能有效改进标准的重触发器结构。

由于传统 CT 系统使用基于模拟的光电二极管传感器,具有电噪声的限制。Cho 等研制了一种基于便携式 CT 的光子计数 CT。计数专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)使用 1.4 mm 厚的晶体碲化镉(CdTe)优化。计数逻辑有全局能量阈值和局部能量阈值,用于校准和高级协议。首先使用钴-57 放射性光子源测量了这种新型探测器的能量响应。其次在 120 kV 的各种电流值下和 1 s 数据采集时间内进行扫描计算其计数率,最后用质量控制/质量保证(QC/QA)模型测量了图像质量。局部能量阈值使信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)提高了 4 倍。并且在 122.06 keV 时,测量的能量分辨率达到 4.51%,计数率为  $1.1281 \times 10^8/s^{-1} mm^2$ ,证实计数传感器的性能足以满足 CT 的应用。

Ren 等利用光子计数探测器 CT(photon-counting detector CT, PCCT)成像系统,进行双相增强 CT 扫描方案,碘强化期对应动脉期晚期,钆强化期对应门静脉期。以 8 mL/s 速率静脉注射钆对比剂马根维显 64 mL 于猪体内,间隔 17 s 后以 5 mL/s 流率注射碘海醇 40 mL。碘对比剂注射 12 s 后进行 CT 扫描,同时获取动脉晚期和门静脉期图像。采用 80 kV,能量阈值为 25、35、50 和 55 keV 的扫描参数,以获取最佳的物质分离和定量分析结果。同时采用基于 CNN 的去噪方法,抑制物质分离过程中的噪声放大。结果表明含碘肝动脉期和含钆肝静脉期可相互区分,采用 CNN 去噪后获取了更好的区分结果。该动物研究证明了单次多能量 CT 扫描中使用双对比剂(碘和钆)进行双相肝脏 CT 扫描的可行性。

光子计数 CT 扫描仪还可用来评估碘和钆对比剂的检测局限性以及信号的可分离性。采用含 0.125~10 mg/mL 的碘对比剂或 0.125~12 mg/mL 的钆对比剂的 20 cm 长水模,进行 CT 扫描,管电压 140 kV,管电流 14~300 mAs。使用光子计数二接收器探测器模式(20, 52 keV)和光子计数四接收器探测器模式(20, 50, 70, 90 keV)两种扫描模式进行扫描。另一组则采用能量集成(energy integrated, EID)CT 系统扫描作为对比。在图像上绘制兴趣区并测值,通过计算等效浓度的碘和钆对比剂的受试者操作特征(ROC)曲线下面积(AUC)来评估其可分离性。结果发现,对于碘和钆,二接收器探测器模式的 CNR 最高,比 EID 模式分别高 21.9% 和 89.5%,比四接收器探测器模式高 10.9% 和 22.5%,而在可分离性上,二接收器探测器模式也高于四接收器探测器模式。因此在该扫描参数下,二接收器光子计数探测器模式具有更好的 SNR,对于碘和钆有更低的检测局限性和更好的信号分离结果。

校准体模和动物腰椎体模分别在双能 X 射线吸收仪(dual-energy x-ray absorptiometry, DXA)、能量集成探测器 CT(energy-integrating detector CT, EICT)和 PCCT 进行成像。在 EICT 上得到了两张不同管电压和过滤组合的拓扑图,在 PCCT 上得到了一张不同能量阈值的拓扑图。对三种方法得到的图像进行骨密度(bone mineral density, BMD)测量。结果表明 EICT 和 PCCT 的拓扑图 BMD 测量准确性无明显差异,且在校准体模中明显高于 DXA。因此,在 EICT 上使用两张不同管电压的拓扑图或在 PCCT 上使用一张不同能量阈值的拓扑图测量骨密度是可行且准确的。

在诊断血管的狭窄程度时,由于部分容积效应,钙化斑块常会影响对血管腔的评估。Tristan 等使用人造狭窄模型研究了多能量 PCCT 在去除血管钙化斑块中的作用。三支直径 4 mm 的人造血管,一支无狭

窄,另外两支呈 50% 环形狭窄,分别有钙化和无钙化。将其放置在一个 30 cm×20 cm 的拟人模型中,用 2 种不同浓度的碘对比剂(7 或 15 mL/L)填充血管,使用 2 种不同的管电压和能量阈值组合在多能量 PCCT 扫描。对于 140 kV 扫描,使用 50, 100, 150 mAs 的曝光;对于 120 kV 扫描,则曝光 72, 146, 218 mAs。利用多能量 PCCT,可仅去除血管斑块钙化部分而保留其他成分。在所有水平的管电压和曝光下,去除钙化的管腔和未钙化的狭窄管腔在视觉图像质量评估中具有较好的一致性,在 150 mAs 和 140 kV 时质量最佳。两种狭窄的总 CT 值偏差均在±4.7% 范围内浮动,且暴露剂量和管电压越低,偏差越大。

PCCT 不仅可去除钙化,还可用于对人体冠状动脉钙化的定量。用 PCCT 对浸泡在水模中的三个人体冠状动脉标本进行扫描,该扫描仪包含 PCD 和能量集成探测器(energy-integrating detector, EID)两个子系统,扫描和重建参数为 120 kV, 9.3 mGy CTDIvol, 以及一个定量的内核(D50)。此外,PCCT 还使用专用锐核(D60)进行额外的重建。标本同时用微型 CT 扫描仪扫描,作为钙化定量的参考标准。在所有图像中,使用半最大阈值技术来识别每个钙化的外部边界,钙化体积则通过计算连续切片中的分段体素之和得到。结果表明 13 个总钙化灶中有 12 个体积变化趋势相似,均为: EID-D50>PCD-D50>PCD-D60>micro-CT。EID-D50、PCD-D50、PCD-D60 和 micro-CT 的中位钙化体积分别为 22.1、21.0、18.2、14.6。因此,与 EICT 相比,PCCT 对人体标本冠状动脉钙化的定量更加准确,图像噪声更低,且其专用锐核(D60)进一步提高了准确性。

当两个或两个以上光子在死区时间内撞击 PCD 的同一像素时,会产生脉冲堆积效应。此时,由单个光子事件引起的电信号变得无法区分,从而导致计数率损失和检测器响应函数失真。Xu 等发现当输入光子通量高到足以引起明显的脉冲堆积时,PCD 可以表现出异常的非线性边缘增强效应,这种效应是由堆积和电荷共享共同引起的。

#### 4. 深度学习

深度学习(deep learning, DL)是当前人工智能领域机器学习最热门的方法。Park 等采用 CNN 模型量化间质性肺病(interstitial lung disease, ILD)的相关特征,将其修改用以预测新型冠状病毒肺炎(COVID-19)的相关特征,如毛玻璃样阴影、网状形态和实变。根据量化结果,训练随机森林模型对 COVID-19 病例和非 COVID-19 病例进行分类。训练集由 57 例 COVID-19 确诊病例作为阳性样本,96 例 ILD 和 496 例正常人作为阴性样本。用 20 例 COVID-19、95 例

ILD、496例正常人组成的独立样本评估量化和分类的性能。结果发现,在 COVID-19 病例中,病灶量化的 Dice 系数为 0.685,鉴别 COVID-19 和正常对照组的 AUC、敏感性和特异性分别为 0.989、1.00 和 0.956,而鉴别 COVID-19 和 ILD 的能力较差,分别为 0.906、1.00 和 0.674。鉴别 COVID-19 和 ILD 的最显著特征是磨玻璃样影的相对体积和基底分布。综上,基于 CNN 建立的量化 ILD 的模型在量化 COVID-19 肺炎中表现良好,然而由于两种疾病 CT 表现相似,该模型鉴别两种疾病相对困难。

对 17 例随访检查的患儿(3~12 岁)行 80 kV(3~6 岁)或 100 kV(7~12 岁)、10 mA、0.35 s 旋转时间的超低剂量胸部平扫。图像采用 ASIR-V50%,使用标准内核和深度学习图像重建(deep learning image reconstruction, DLIR),根据设置分为低(DL-L)、中(DL-M)和高(DL-H)三组,对照组为 3 个月前接受常规放射剂量 CT 扫描的患儿,用 ASIR-V50%重建图像。两名放射科医生独立评估肺大气管的图像,采用 5 分量表评估图像质量并记录辐射剂量。结果表明与常规放射剂量 CT 扫描相比,用 DL-H 重建的超低剂量胸部 CT 图像具有同等的图像质量,可良好评估肺大气管,并可降低 98%的辐射剂量。

Wang 等在宽探测器螺旋 CT 使用不同管电流(200 mA、150 mA、100 mA、50 mA)对 Catphan 500 体膜进行了扫描,用 FBP(ASiR-V0%)、ASiR-V40%、ASiR-V80%和三个级别的 DLIR(DL-L、DL-M、DL-H)分别重建 CT 图像。使用 imQuest 软件(Duke)计算噪声信号功率谱(noise power spectrum, NPS),测量 NPS 峰值和峰值频率来评估噪声大小和纹理。所有重建方法的 NPS 峰值随着剂量的增加和重建水平的提高而降低,FBP 法在所有剂量水平下的 NPS 峰值和峰值频率都最高,ASiR-V40%的 NPS 峰值高于所有 DLIR 水平,ASiR-V80%的 NPS 峰值仅高于 DLIR-H,低于 DLIR-L。DLIR 的平均 NPS 空间频率高于 ASiR-V。因此,与 FBP 和 ASiR-V 相比,新的 DLIR 算法在不改变噪声纹理的情况下,降低了噪声幅度。

对 33 例儿童(4 个月~13 岁)行 70 kVp、自动管电流调节的低剂量胸部 CTA 扫描,噪声指数根据儿童年龄设定在 11~15 岁,对比剂(CM)剂量为 0.8~1.2 mL/kg。分别采用 50%和 100%ASIR-V,标准内核和高设置的 DLIR(DL-H)进行图像重建。两名放射科医生对图像的整体噪声、血管边缘和血管对比度分别进行评估。测量同一图像层面主动脉和背部肌肉的 CT 值和图像噪声,以获得客观图像质量,同时记录辐射剂量。50% ASIR-V、100% ASIR-V 和 DL-H 的图

像噪声分别为  $29.45 \pm 7.59$ 、 $20.45 \pm 6.93$  和  $19.24 \pm 5.77$ ,仅有 DL-H 图像在图像质量定性评价的 3 个方面均获得了可接受的分数。因此,采用 70 kVp 和 DL-H 算法,在儿童胸部 CTA 中以低辐射剂量和对比剂剂量提供临床可接受的 CTA 图像是可行的。

Cao 等探讨了 DLIR 在腹部增强 CT 中降低辐射剂量、改善图像质量的可行性。对 40 例肝病患者行腹部增强 CT 检查,动脉期(AP)和门静脉期(PP)扫描采用常规参数:管电压 120 kV,自动管电流,噪声指数(NI)11,延迟期(DP)采用极低剂量扫描(NI=24)。所有图像均使用 ASIR-V50%重建。另外利用 DL-H 对 DP 图像进行重建。由两名放射科医生采用 5 分制对整体图像质量进行评估。结果显示与 AP 相比,DP 的辐射剂量降低 76%,但 DL-H DP 图像质量与 ASIR-V50% AP 图像无显著差异( $3.98 \pm 0.44$  vs  $4.10 \pm 0.33$ ,  $P = 0.28$ ),且明显优于 ASIR-V50% DP 图像( $3.98 \pm 0.44$  vs  $2.50 \pm 0.56$ ,  $P < 0.05$ )。此外,AP 图像分别采用 DL-H 将图像重建成 1.25 mm 层厚和使用 ASIR-V50%重建成标准的 5 mm 层厚,计算肝脏病变的 SNR 和 CNR,由两名放射科医生采用 5 分制对整体图像质量评分。结果表明 DL-H 图像质量明显高于 ASIR-V50%图像质量(4.30 vs. 4.10,  $P < 0.05$ ),虽然 DL-H 图像肝脏病变的 SNR 和 CNR 也高于 ASIR-V50%重建的图像,但无显著性差异。

实体瘤疗效评价标准(response evaluation criteria in solid tumors, RECIST)是临床试验中评估系统性癌症疗效的国际标准测量方法,然而阅片者间和阅片者本人的可变性和主观性影响了化疗决策。Tang 等将深度学习系统自动产生的 RECIST 测量值与放射科医生的测量值进行了比较。数据集涉及 4427 名具有 RECIST 注释的独立患者的 CT 图像,病变类型多样。将其分为训练集( $n = 3727$ )、验证集( $n = 500$ )和测试集( $n = 200$ ),由两位经验丰富的放射科医生对每个病灶进行重新测量。半自动系统是一个两级 CNN,使用之前需由放射科医生在感兴趣的病变周围画一个方框。通过随机生成 10 个仔细绘制的边界框和 10 个粗略绘制的边界框来模拟该过程。结果表明 CNN 半自动测量结果较放射科医生测量结果更接近参考值,且每次测量仅耗时 0.2 s,放射科医生则需( $20 \pm 12$ )s。粗略绘制的方框与仔细绘制的方框相比,并不会显著降低精确度。综上,该半自动标注系统达到了与专家相当的准确性,降低了可变性,提高了工作效率。

危险器官(organ at risk, OAR)的准确勾勒是头颈部肿瘤放射治疗的关键步骤,深度学习也可用于自动分割 OAR 从而减轻医生负担。数据集来自 142 例

口腔癌患者的42个OAR掩膜的CT图像,这些患者均为II期以上,并接受了放疗。一种分层的OAR分割方法将OARs分为3个级别,即稳定、中等、小而难(small and hard, SandH)。结果表明稳定的OAR有高对比度,操作者间可变性较低,中等OAR对比度较低,而SandH OAR的对比度很差。该方法的平均Dice评分(DSC)为75.1%,较以前的主流方法UaNet相比,中等和SandH OAR分割的DSC增加了3.3%。

Cai等回顾性收集了一个包含995例肝脏切除或移植的患者的动态增强(dynamic contrast enhanced, DCE)CT数据集,扫描方案包括非对比期、动脉期、静脉期和延迟期。为了发现和定位肝细胞癌(hepatocellular carcinoma, HCC)病变,其中897例被用作训练集培训了一种新型检测系统,对直径大于或小于5cm的肿瘤的检测灵敏度分别为86.5%和70%。对于Ishak评分 $\leq 4$ 和 $> 4$ 的患者,检测灵敏度分别为86.1%和71.2%。因此,该方法可对患有慢性肝病的患者进行准确的HCC检测。

采用标准剂量的区域探测CT(area-detector CT, ADCT)、普通分辨率CT和UHR-CT分别对定量成像生物标志物联盟(quantitative imaging biomarkers alliance, QIBA)推荐的胸部CT体膜进行5次普通分辨率、高分辨率和超高分辨率的扫描。然后将每组CT数据分别用FBP、混合型迭代重建(iterative reconstruction, IR)、基于模型的IR和深度学习重建(deep learning reconstruction, DLR)重建成0.5 mm和1 mm的层厚。将测量的肺密度CT值与气道壁厚度与标准参考值进行比较并计算差值。结果表明,在相同扫描模式下与两种层厚条件下,DLR的肺密度CT差值明显小于FBP、混合型IR和基于模型的IR( $P < 0.001$ ),DLR和基于模型的IR所得到的气道壁厚度差值均显著小于FBP和混合型IR( $P < 0.001$ ),说明新开发的DLR在肺密度和气道壁测量精度方面具有更好的潜力。

一项回顾性多中心研究纳入了10395名接受了低剂量CT肺癌筛查(low-dose CT for lung cancer screening, LDCT-LCS)的成年受试者,将7433名无心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)的受试者和2962名有CVD的受试者随机分为训练集(70%)、验证集(10%)和测试集(10%)。采用的DL算法包含三个组成部分:基于深度CNN的检测器在低剂量CT(low-dose CT, LDCT)分割心脏区域;基于深度CNN从孤立心脏体积上提取CVD相关特征;合并临床风险评估。并对该算法在106名患者的非ECG门控LDCT-LCS上进行了进一步测试。这些患者在LDCT-LCS后的12个月内进行了冠脉钙化(coronary

artery calcium, CAC)评分、CAD-RADS评分和MESA评分。结果表明与以前的DL模型((KAMP-Net; AUC 0.725, AE+SVM: AUC 0.684)相比,该算法识别CVD风险的AUC更高,达到0.869。此外,该算法预测CAC、CAD-RADS评分、MESA评分的AUC分别达到0.942、0.809和0.817。

由于螺距大于1.5的重建图像存在严重的视野受限伪影,目前,单源CT扫描仪一般在螺距小于1.5的情况下工作。Hayes等开发了一种新的重建框架,结合了DL技术和先验图像约束压缩感知(prior image constrained compressed sensing, PICCS)。回顾性收集1332例患者的腹部和胸部CT检查结果,通过使用16、32和64排探测器的临床CT图像体积的正投影来模拟螺距为2、3和4的螺旋CT正弦图数据,然后对所有模拟正弦图像进行FBP重建,并与参考CT图像配对以训练DL网络。DL网络的输出被用作PICCS中的先验图像,以产生DL-PICCS图像。为了评估DL-PICCS的性能,进行了261次额外的CT检查并使用结构相似性(structural similarity, SSIM)评估图像质量。结果表明DL-PICCS图像在视觉上没有明显的伪影,螺距2、3、4的图像定量SSIM值分别为 $0.998 \pm 0.001$ 、 $0.978 \pm 0.008$ 和 $0.955 \pm 0.013$ 。因此DL-PICCS可实现螺距为4.0的单源螺旋CT图像的高质量重建。

Richard等还评估了基于人工智能的虚拟滤线栅抑制算法在不同大小患者CT图像中的应用。在拟人化胸部体模前后放置不同数量亚克力板模拟患者不同的厚度,分别扫描获得无滤线栅、6:1滤线栅、12:1滤线栅的图像。使用U-Net深度学习算法处理无滤线栅采集图像,使用高剂量低散射图像进行训练,以预测使用滤线栅导致的散射和噪声增加。无论是物理滤线栅还是虚拟滤线栅,图像特征对比都有明显改善。12:1滤线栅提供了最高的对比度水平,但同时具有最高的噪声水平。基于人工智能的虚拟滤线栅在提高图像对比度的同时仍保持较低的噪音水平,在肺特征方面,虚拟滤线栅的CNR提高了29%~53%。但对于纵隔特征,虚拟滤线栅的CNR仅提高了4%~8%,低于物理滤线栅。

## 5. 临床相关研究

Gao等对48例COVID-19患者和48例正常筛查病例行CT扫描,然后对所有患者进行肺分节,利用沿z轴的解剖性标记,30个肺部标记即可消除轴向变量。纹理测量(Haralick特征)从每个轴向交叉图像在相应的肺标记沿z轴计算,以生成拟研究的敏感点的轮廓,得到正常受试者和COVID-19患者之间的纹理测量向量距离的斜U形分布。个体Haralick特征分析显

示出区分 COVID-19 与正常肺筛检病例敏感度最高的 12 个特征。直方图分析显示 COVID-19 受试者强度较高,符合 COVID-19 的表现,如磨砂玻璃影、实变等。该方法在鉴别诊断中具有重要价值。

Wu 等收集了接受冠状动脉 CT 血管成像 (coronary CT angiography, CCTA) 的 180 例疑似冠心病患者。CCTA 检查期间,在一个心动周期内对所有患者进行 40%~50% 和 70%~80% 的时间相位采集,并使用智能相位技术重建最佳的收缩和舒张图像。根据检查结果将患者分为两组:阴性患者和冠心病患者。在离主动脉根部 5 cm 处测量同一患者的左前降支、左回旋支、右冠状动脉收缩期和舒张期的直径,结果显示:在阴性患者中,脉搏舒张期左前降支、左回旋支和右冠状动脉运动的测量直径 ( $1.96 \pm 0.21$  mm,  $1.57 \pm 0.16$  mm,  $1.88 \pm 0.19$  mm) 均大于收缩期 ( $1.72 \pm 0.17$  mm,  $1.36 \pm 0.18$  mm,  $1.52 \pm 0.12$  mm), 差异有统计学意义。在冠心病患者群体中,左前降支、左回旋支和右冠状动脉的直径在舒张期和收缩期无明显差异。

Zopfs 等纳入了 571 例受试者,均接受等量的对比剂然后行胸/腹部 CT 检查,分别放置 ROI 于实质器官 ( $n=25$ )、淋巴结 ( $n=6$ ) 和血管 ( $n=3$ ), 测量绝对碘浓度 (iodine concentration, IC)。结果显示淋巴结、实质器官和血管的 IC 值随年龄、性别和体重指数的不同而有显著差异 ( $0.0 \pm 0.0$  mg/mL ~  $6.6 \pm 1.3$  mg/mL)。腹主动脉标准化后,碘灌注率与体重指数无关,而随着年龄的增长,灌注比有下降的趋势。该研究确定了腹部器官、淋巴结和血管中 IC 的大规模队列参考值。

对 40 例深静脉血栓 (deep venous thrombosis, DVT) 患者首次 CT 检查时血栓的含水量与对侧正常血管的含水量进行比较,同时用 DECT 物质分离法分离水、血栓和软组织,鉴定血栓的含水量,发现血栓的含水量明显低于对侧血管。5 例股静脉、膝下静脉和胫后静脉血栓的患者,在注射对比剂前行 DECT 成像,生成相应的水加权像。由 5 名放射科医生进行目测评估,5 例均可在未加对比剂的水加权图像上显示静脉血栓的位置。因此,DECT 在不加对比剂的情况下获得的水加权图像能有效地显示血栓。

## 6. 其它新技术

3D 打印技术开发的定制纹理体模被用于评估放射组学在各种常规腹部成像方案下的性能。在 4 台 CT 扫描仪 (Philips Brilliance 64、Canon Aquilion Prime 160、GE 16 Lightspeed 和 Siemens Sensation 10) 上进行扫描,使用一系列成像参数 (如层厚、视野、重建后滤过、管电压和管电流) 来评估基于 CT 的纹理分析 (CT-based texture analysis, CTTA)。纹理模型由 375 个特征组成,分别属于 15 个纹理提取方法的亚

组。结果表明,强度指标,即灰度共生矩阵 (gray-level co-occurrence matrix, GLCM) 2D 和 GLCM 3D 显示了很高的组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC)。与其他成像变量相比,层厚的变化对所有指标的影响更为显著。kVp 和 mAs 的变化主要影响高阶纹理指标如图像变换;离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 和定律变换 (laws transform, LTE)。

一种“全辅助扫描技术”-3D 相机 (FAST 3D Camera™) 被开发出来用于在 CT 机架中自动定位患者。有研究回顾性评估了 2018 年 10 月 1 日-2019 年 3 月 19 日使用 3D 相机扫描的 571 项 CT 检查和未使用该技术的 504 项检查,发现使用和未使用 FAST 3D 相机时,与真实中心的偏差分别为 ( $6.81 \pm 6.09$ ) mm 和 ( $16.31 \pm 14.00$ ) mm。FAST 3D 相机提高了患者定位的准确性和一致性,同时减少了检查时间 (32 s)。

Ueta 等通过双能和单能两种扫描模式对直径 300 mm 圆柱形体模进行扫描,前者包括三种 DECT 技术:分离滤波 (split-filter, SF)、双源 (dual-source, DS) 和快速千伏峰值切换 (fast kilovolt peak-switching, FKS)。在碘对比度相等的情况下,DECT 的虚拟单色重建与单能 CT (single-energy CT, SECT) 相比,图像质量有所下降,特别是 FKS 和 SF 在低能时下降明显,这凸显了低能和高能之间的能量分离和剂量优化对于高效双能成像的重要性。

## X 线

### 1. COVID-19 相关研究

虽然胸部 X 线摄影和胸部 CT 在 COVID-19 的诊断中提供了较好的结果,但是,由于辐射风险,一些机构不鼓励以此为目的使用该成像方式。有研究根据意大利 159107 例患者的流行病学数据分析各年龄组的死亡率。对进行了胸部 CT 扫描的 659 例成年患者,使用基于蒙特卡洛法估计器官剂量,计算辐射风险指数,转换成相关的五年死亡率。结果表明,所有年龄的胸部 CT 和胸部 X 线摄影的中位死亡率为 0.72% 和 0.03%,辐射风险并不是 COVID-19 中使用影像学检查的唯一考虑因素,但是仍然是一个重要因素,COVID-19 的 CT 和 X 线摄影的相关风险在不同年龄组呈现不同趋势。在较高年龄,COVID-19 风险远超放射学检查。胸部 X 线摄影和胸部 CT 分别适用于年龄大于 30 岁和 50 岁的 COVID-19 患者。

Abadi 等对现有的虚拟成像试验平台进行调整,学习 COVID-19 的特征,对确诊 COVID-19 患者的所有与该疾病相关的肺部特征进行人工分割,由心胸外

科放射科医师验证。分割的特征被制作成 4 维扩展的心脏躯干(4D extended cardiac-torso, XCAT)体模。在病变区域内, XCAT 体模中的肺实质纹理和物质被改变, 以匹配临床图像中的物理特征。采用扫描专用的 CT 和 X 线摄影模拟器对 XCAT 体模进行虚拟成像。结果表明模拟的病变具有真实的形状和纹理, 同时该平台可以在不同参数下对同一患者进行两种不同模式的成像, 在病变区域, 5 mAs、25 mAs、50 mAs 的图像噪声比为 1.6、3.0 和 3.6。因此该虚拟成像试验能有效地评估和优化 CT 和 X 线摄影, 为其在 COVID-19 大流行中的应用提供了基础。

为应对 COVID-19 大流行期间患者激增的情况, 便携式 X 光设备被用来通过隔离室的玻璃或户外分诊帐篷区进行成像, 为评估此条件下图像质量和患者、工作人员的辐射安全性, McKenney 等利用体模定量评估图像质量和曝光量, 结果表明通过在相同的管电压下将管电流加倍, 可透过玻璃扫描获得满足诊断需求的胸片图像。由于低能 X 射线的衰减, 患者接受剂量基本保持不变。在此非标准成像条件下, 由于 X 射线散射的存在, 辐照剂量一般在限制剂量以下。

## 2. 人工智能

Fujimoto 等建立了一个新的计算机辅助诊断(computer-aided diagnosis, CAD)系统来模拟解剖结构(anatomical structures, ASs)的正常状态, 并根据由于疾病引起的 ASs 的变化来检测异常。其算法包括对 ASs 特定区域的分割和异常检测。8 个 ASs 被选择: 气管、降主动脉、右心房、左心室、右膈肌、左膈肌、右肺底背部、左肺底背部, 以解决纵隔、肺底等部位易被忽视的问题。一种完全卷积网络 U-Net 作为分割网络, Hotelling 理论作为异常检测方法。用 667 例正常病例对 U-Net 进行训练, 243 例正常病例被制作为正常模型作为度量标准。558 例正常病例和 110 例异常病例(肺癌、肺炎等)用于异常检测和评估。8 种 ASs 的平均敏感度和特异度分别为 74% 和 83%。但是在某些异常病例中, 靠近病灶的 ASs 仍能很好地被分割, 出现假阴性。因此, 在 ASs 附近能够表达外观常态的度量标准应该被添加。

Gao 等训练了一个深度卷积神经网络(deep convolutional neural network, DCNN)以对数字乳腺断层摄影(digital breast tomosynthesis, DBT)进行降噪。利用 GE 公司的 X 射线激发工具 CatSim, 调整 GE DBT 系统, 对 24 个不同的数字乳腺体模采用 25 度角扫描, 生成 9 幅投射视图(projection views, PV)。从重建的 DBT 层面中随机选取了 96000 对有噪声和去噪声的实质部位用作训练集。另外在人体上进行的 DBT 扫描被用作独立的测试集, 60 度角扫描, 生成 21

个 PV。为评估 CNR 和半峰宽(full width at half maximum, FWHM)的变化, 标记了 301 个不同大小的微钙化。结果显示在 DBT 测试集中, 经 DCNN 去噪后, 肿块边缘和针状组织形态保存良好, CNR 平均升高了 93%, 微钙化的 FWHM 未见明显改变。因此, 经体模训练的该 DCNN 可用于人体 DBT 的降噪处理。

## 3. 新技术

Nguyen 等采用与现代美国联邦运输安全管理局行李检查站类似的 X 线显微层析合成(X-ray microtomosynthesis, XRMT)扫描仪检测了淋巴管平滑肌瘤病(lymphangioliomyomatosis, LAM)患者和 BHD 综合征(Birt-Hogg-Dubé syndrome)患者的肺活检标本, 每个组织块扫描 15 min, 然后被重建成 5~7  $\mu\text{m}$  体素大小的 Z 轴堆叠图。LAM 标本的重建横截面显示囊肿壁部分增厚, 表现为高衰减, 组织学显示壁的一部分是类似于 LAM 结节的平滑肌细胞, 而壁上不同的高衰减信号是红细胞的聚集。BHD 综合征患者组织块的重建横截面在囊肿壁和邻近壁的圆形结节中仅表现低衰减特征, 这些被确定为具有或不具有聚集红细胞的血管, 但不存在异常的平滑肌细胞。XRMT 可在传统的组织病理学方案中引导切片和目标分析, 充当放射病理学特征解释的媒介。

Taguchi 提出了一种新方法, 使用无旋转机架的标准 X 射线系统进行术中 4 维软组织灌注(Intra-operative 4-dimensional Soft Tissue Perfusion Using a Standard X-ray System with No Gantry Rotation, IPEN)。其使用两个输入数据集: 三维 ROI 的轮廓和位置, 如动脉和肿瘤病变的层面; 通过注射对比剂获得的一系列 X 线投影数据。然后, IPEN 通过最大化合成投影和测量投影之间的一致性, 直接从投影中估算每个 ROI 的时间增强曲线(time-enhancement curve, TEC), 而无需重建横轴面图像。通过计算机模拟来评估 IPEN 算法的性能, IPEN 估计的 TECs 在临床剂量水平下足够准确。即使病灶增强不均匀或者 ROI 轮廓不准确, 但 Dice 系数  $>0.81$  时, IPEN 算法也能准确估计 ROI 特异的 TECs, 从而可以在介入手术中评估软组织血液灌流情况。

钨靶的焦点功率密度限制了 X 射线源的功率, 从而限制了成像速度。Tan 等设计并制作了一种新型的 X 射线靶, 在 W 型金刚石靶体上沉积了一层薄钨膜, 模拟结果表明, 钨靶入射电子产生的热量高度集中于焦点附近, 由于金刚石基片的高导热性和相对较高的稳定温度, 可以更快地去除热量, 实现更高的 X 射线输出, 但钨膜的厚度需要针对特定的 kVp 设置进行优化。

## 4. 辐射剂量

Sun 等比较了在透视引导成像 (fluoroscopically-guided imaging, FGI) 过程中, 光束入射角校正和未校正情况下皮肤剂量的差异, 发现在剂量跟踪系统 (dose tracking system, DTS) 的剂量图上, 有角度校正 FGI 操作的患者比无角度校正的患者在表面入射角度小于正常的区域所计算的皮肤剂量更低, 剂量面积乘积减少了 2~4 倍以上。角度矫正因子 (angular correction factors, ACF) 的应用提高了皮肤剂量估算的准确性, 特别是在小入射角占优势的操作中。

Jeong 等提出了一种基于碳纳米管 (carbon nanotube, CNT) 发射器的数字 X 射线管进行自适应可变剂量率 (adaptively variable dose-rate, AVD) 荧光检查的方法。基于 LabVIEW 的控制程序逐帧分析检测器获取的图像, 然后根据物体的运动自动调整 X 射线剂量和帧率, 从而在给定条件下将不必要的剂量减少了 40%。AVD 荧光透视系统可根据患者器官或手术器械的运动快速准确地控制脉冲 X 射线剂量, 从而减少不必要的辐射暴露, 并获得与前相同的图像质量。

Matsubara 评估了测量医务人员镜片剂量时所用的小型剂量计的性能。将剂量计粘贴在放射防护眼镜 (0.85 mm 铅) 上的八个位置, 并将其放在模拟内镜逆行胰胆管造影 (endoscopic retrograde cholangiopancreatography, ERCP) 的医生模型上, 对患者体模照射 X 射线 10 min 后, 获得每个位置的累积剂量作为空气比释动能。结果显示各类型剂量计的剂量线性良好, 在有锡滤波器的对光刺激发光剂量计 (optically stimulated luminescence dosimeters, OSLDs) 和放射光致发光玻璃剂量计 (radiophotoluminescence glass dosimeters, RPLDs) 中, 能量依赖性小, 而没有锡滤波器的 RPLDs 的能量依赖性大。OSLDs 在垂直方向上表现出方向依赖性, 而 RPLDs 在水平方向上表现出比 OSLDs 更大的方向依赖性。眼镜内部、眼镜外部和左侧边框内部的剂量计之间, 可以观察到空气比释动能的显著差异。与右侧有和没有锡滤波器的 RPLDs 相比, OSLDs 的剂量明显降低。因此, 三种剂量计具有不同的特性, 从而影响透视检查时 ERCP 医师的眼镜剂量测量值。

## 磁共振成像 (MRI)

### 1. 深度学习

多发性骨髓瘤患者 MRI 上脊椎的分割仍然具有挑战性, 因为多发性骨髓瘤浸润会导致椎体 MR 信号的巨大变化。Zhou 等使用包含多个椎体完整矢状面的 MR 图像来训练 2D U-DL (U-Net deep learning network) 用于同时检测和分割脊椎, 通过一种新的基于预测椎体间距离的相异度测量的设计来加权 Dice

系数, 并将其与交叉熵结合作为代价函数来训练 U-DL。选取 49 例共 885 个椎体矢状面的 122 个 T<sub>1</sub>W 序列作为训练集, 另有 17 例用于独立测试, 以放射科医生勾勒出的 3D 椎体作为参考。结果表明, 在测试集中, 2D U-DL 对 5 个假阳性 (false positive, FP) 的椎体检测敏感度为 97.0%, 椎体分割的平均 3D Dice 系数为  $0.835 \pm 0.148$ 。而用单个椎体训练的 3D U-DL 仅具有 92.0% 的检测敏感度 (26 个 FP), 分割的平均 3D Dice 系数为  $0.788 \pm 0.147$ 。与单个椎体训练的 3D U-DL 相比, 2D U-DL 具有在 MR 矢状面上学习脊柱解剖的潜力, 对椎体的检测和分割都更准确。

扫描时间长和有限的 SNR 对获取 < 2 mm 各向同性体素大小的高分辨率扩散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 构成了重大障碍。Li 等提出了一种深度学习的方法, 用低分辨率、高 SNR 的扩散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 合成高分辨率 DTI 图。预处理 T<sub>1</sub>WI 和 DWI 数据 (分辨率 1.25 mm, b=1000, 90 个统一方向), 使用 3D CNN 将低分辨率扩散数据 (1 张 b=0 的图像和 6 张 DWIs) 与 T<sub>1</sub>WI 作为输入图像映射到输入低分辨率和目标高分辨率扩散图像的残差。通过对插值后的低分辨率扩散数据拟合扩散张量模型, 然后逆扩散张量变换, 优化了 6 个输入 DWIs 来表示图像空间中的 6 个张量分量。T<sub>1</sub>WI 被纳入到输出 DWIs 中以勾勒出不同的组织并保留结构细节。各向同性分辨率为 1.25 mm 的 CNN 生成的 b=0 图像和 DWI 在视觉和定量上与真实图像相似, 平均绝对误差 (MAE) 分别为 0.012 和 0.013, 峰值 SNR 分别为 34.0 dB 和 30.7 dB, 结构相似指数均为 0.98。

Wei 等开发了一种多任务驱动的多分辨率网络, 用于头颈部放疗 MRI 中的海马自动分割。将简单的跳跃连接替换为多分辨率的跳跃连接, 将几个剩余块连接起来产生多分辨率的特征图。为了进一步提高分割精度, 在网络中添加了一个辅助的边缘回归任务, 帮助模型更加关注边界。同时用 ramp up 函数逐步增加回归任务的权重, 从而获得更准确的边缘位置。该方法在 247 张 T<sub>1</sub>/T<sub>1</sub> 增强 MRI 图像上评估, 其中 227 张用于训练, 剩余图像用于测试, 采用 DSC、Hausdorff 距离 (HD) 和平均对称表面距离 (average symmetric surface distance, ASSD) 定量评价分割精度。该方法的 DSC 为 87.0%, HD 为 5.65 mm, ASSD 为 0.55 mm。而使用简单跳跃连接的 U-Net 其相应性能指标分别为 85.9%、6.45 mm 和 0.64 mm。

### 2. 临床相关研究

5 名健康志愿者 (3 名男性, 2 名女性, 平均年龄 19.4 岁) 被纳入了一项前瞻性研究, 所有受试者均接

受 3.0T 的 MRI 检查,包括 3D  $T_1$  WI、DTI 和非均匀磁化转移(inhomogeneous magnetization transfer, ih-MT) 成像。采集 ihMT 后,利用内部开发的基于 MATLAB 的脚本计算磁化转移比值(magnetization transferration, MT)、定量 MT(qMT)、ihMT 比值(ih-MTR)和定量 ihMT(qihMT)4 个参数图。内部开发的自动化程序被用于白质束的分割,不同白质束的模板被应用于每个受试者的 ihMTR、qiHMT、各向异性分数(fractional anisotropy, FA)、平均扩散率(mean diffusivity, MD)、轴向扩散系数(axial diffusivity, AD)和径向扩散系数(radial diffusivity, RD)图。结果显示 ihMTR、qihMT 和 FA、RD 之间的相关性最强。ihMTR、qihMT 和 MD、AD 间呈中到弱相关。ihMTR 和 DTI 指标之间的相关性为:FA(CI=0.851,  $P<0.0001$ )、RD(CI=-0.746,  $P<0.0001$ )、MD(CI=-0.598,  $P<0.0001$ )、AD(CI=0.278,  $P=0.008$ )。该研究提供了 ihMT 对人脑中髓鞘敏感的新证据。

一次心动周期中脑搏动可以通过两种机制改变 ADC:脑实质本身的固有运动与水分子的波动。Okamoto 等用整体运动补偿扩散编码成像(bulk-motion-compensated diffusion encoding, BKCDE)分析了脑内 ADC 值在心动周期中的变化。采用 3T MRI 心电图同步单次激发扩散回波平面成像( $b=0, 200$  以及  $b=200, 1000$ )采集 9 个健康志愿者心动周期中颅脑横轴面多相位 ADC 图,使用整体运动非补偿扩散梯度(uncompensated diffusion gradient, non-MC)和第一(1st-MC)以及第二整体运动补偿扩散梯度(2nd-MC)。计算脑组织 ADC 改变率,公式为  $(ADC_{max} - ADC_{min}) / ADC_{min} \times 100\%$ ,  $ADC_{max}$  和  $ADC_{min}$  分别为一次心动周期中的最大和最小值。最后,联合不同的  $b$  值比较 ADC 改变率。结果表明 non-MC、1st-MC、2nd-MC 在不同  $b$  值时组间 ADC 改变率没有显著差异,non-MC、1st-MC、2nd-MC 在  $b=0\sim 200$  时的 ADC 明显大于  $b=200\sim 1000$ 。因此心动周期中 ADC 改变主要由脑搏动带来的水分子波动引起的,而不是脑实质的固有运动,水分子波动对低  $b$  值组合更加敏感。

Chang 等选取了 2018 年 1 月—2019 年 10 月临床诊断为缺氧缺血性脑病(hypoxic-ischemic encephalopathy, HIE)的足月新生儿共 40 例,根据其预后将其分为预后良好组和预后不好组。两组新生儿均做 3D 动脉自旋标记(arterial spin labelling, ASL)以及 DWI 检查。比较兴趣区的局部脑血流(rCBF)和 ADC。结果表明在基底节、丘脑和灰质,预后不良组的 rCBF 和 ADC 值显著高于预后良好组。两组患者白质的 rCBF 和 ADC 值没有显著差异。经 Pearson 相关分析,平均 rCBF 与 ADC 呈负相关( $r=-0.61$ ,

$P<0.05$ )。在预测预后方面,rCBV 的 AUC 为 0.972, ADC 的 AUC 是 0.842。

17 例肝脂肪分数大于 5% 的患者入组,均进行了 3T 磁共振腹部检查,包括 DWI 和氢质子磁共振波谱( $^1H$ -MRS),定量评估肝脂肪变性。患者也进行了超声检查以获得肝硬度评估。测量肝右叶定量扩散参数。肝脉管密度生物标记物(liver vessel density biomarkers, LVD)评估由兴趣区内  $b_0$  和  $b_{50}$  图像之间的信号强度差异或相对于  $b_0$  图像的信号强度值计算。结果表明 LVD 随肝硬化程度不同而有差异,LVD 可能替代体素内不相干运动成像(intravoxel incoherent motion, IVIM)所得到的肝的快速扩散分数。

### 3. 新技术

Ohno 等提出了一种用压缩传感与高加速敏感性编码技术(compressed sensing combined with a highly accelerated sensitivity encoding, CS-SENSE)相结合的新方法,扫描 QIBA 扩散模型,在 3T MRI 上选择单次激发平面回波成像(single-shot echo-planar imaging, SS-EPI),敏感性编码(sensitivity encoding, SENSE)因素为 4,  $b=0, 500, 900$ 。通过常规的 SENSE 和 CS-SENSE 重建获得扩散加权图像,另外以 QIBA 标准化协议进行的扫描作为参考标准。在这项研究中,CS-SENSE 的 SNR 显著高于 QIBA 标准化扫描和常规 SENSE(分别为  $174 \pm 33, 103 \pm 20, 70 \pm 20$ )。CS-SENSE 的 ADC 与 QIBA 标准化的 ADC 一致( $R=0.995, P<0.001$ ),但失真率较低。对 8 名肝损伤患者进行扫描发现 CS-SENSE 中的病变与肝脏对比率较常规 SENSE 明显改善( $2.1 \pm 0.5$  vs  $1.6 \pm 0.4, P<0.05$ ),噪声明显降低。

一项前瞻性研究招募了 16 名健康志愿者,8 例在 3T MRI 接受了肝胰 DWI 扫描,为了评估 DWI 序列的可重复性,每个志愿者都被扫描了两次。每一次均采集了两个呼吸触发的 DWI 序列,一个是常规序列,另一个是运动补偿的扩散梯度序列。由 2 名放射科医生独立测量 ADC 值。ADC 图上,在肝脏每个 Couinaud 节段绘制 ROI,避开血管结构。胰腺的 ROI 则分别放置在头、颈、体和尾部。采用 Bland-Altman 分析和重复性系数评估 ADC 值的测量重复性。结果表明运动补偿的 DWI 能够恢复心脏运动或心血管搏动造成的丢失信号,从而获得更均匀的 ADC 图。与常规 DWI 相比,使用运动补偿 DWI 的肝脏和胰腺的 ADC 测量重复性都得到了改善。

Klein 等结合了 0.35T 场强的中场永磁体磁共振(MAGNETOM C! 西门子医疗,德国)和太阳能电池,用四通道线圈和信号处理进行磁共振成像,梯度为 25 mT,转换速率为  $55 T \cdot m^{-1}/s$ 。电源要求为待机

状态下 2 kW,扫描状态下 9 kW。太阳能光伏电池的峰值总功率为 29.98 kW,太阳能电池板的产电量比整个机组的功耗高出 40%左右。短时间存储采用 10 kW·h 锂离子电池,能够覆盖夜间 5 h 的待机操作。该技术使磁共振成像摆脱了对电能和氦的依赖。

Elliott 等利用交叉对比差异图谱来比较了治疗计划系统 Ray Station(RS)、FSL(来自英国牛津大学 FMRIB 分析小组)和 Anderson 肿瘤中心内部方法与传统方法所生成的 ADC、FA 参数的可重复性。样本为 20 个脑肿瘤患者的 DTI 数据。三者所生成的 ADC 和 FA 图谱之间显示了一致的结果。ADC 图的平均误差在内部方法和 FSL 之间为 1.8%,在内部方法和 RS 之间为 0.07%,在 RS 和 FSL 方法之间为 1.6%。FA 差异图的均值±95%置信区间在内部方法和 FSL 之间为  $0.0002 \pm 0.027$ ,在内部方法和 RS 之间为  $-0.0003 \pm 0.01$ ,在 RS 和 FSL 之间为  $-0.0002 \pm 0.027$ 。

## 超声 (ultrasound)

CT 或 DR 扫描对隔离的 COVID-19 患者来说昂贵且不方便,无线手持超声表面积小,比 CT 或 DR 机更容易消毒,与患者有限的接触面积可减少接触传播,已经成为对隔离患者最有前景的成像方式。Liu 等对隔离病房 20 例 COVID-19 感染患者进行了无线超声检查。其中胆囊结石 2 例,胆汁淤积合并胆囊炎 1 例,巨大肾结石合并肾盂积水 1 例,痛风性关节炎 2 例。此外,也尝试通过无线手持超声检测 2 例患者的肺炎,评估疾病进展或疗效。无线手持超声可以快速诊断并发病,有助于医生制定合适的治疗方案,降低误诊率。

Li 等为了解决常规超声评估肝纤维化主观因素较强的问题,将 CAD 与超声结合进行了研究性评估。228 例乙型肝炎患者采用 Siemens、Philips 和/或 Toshiba 扫描仪分别扫描了 3 次,每次超声检查由来自 6 个不同视角的多达 14 个超声图像组成,总共产生 7615 个图像。经一位肝病专家判断,95 名患者有中到重度纤维化。基于深度学习的 CAD 方法使用 ResNet-50 为主干,还包含以下创新点:对于每幅图像均用预先训练的 U-Net 勾画出肝脏区域及上边界;使用全局异质影像融合(global hetero-image fusion, GHIF)允许网络整合来自单个图像的特征来预测纤维化的概率,其可使用任意数量的超声图像;使用视图特定参数(view specific parameters, VSP)根据所呈现的特定肝脏视角来定制分析。最后用 5 次交叉验证对结果进行评价,识别中度到重度的肝纤维化的 AUC 为 0.912,部分 AUC 为 0.783( $FNR \leq 0.3$ ),高于单纯的 ResNet-50 分类器。85%精度下达到 78.3%的召回

率。

为了探究碘对比剂的存在是否会影响对比剂微泡的亚谐波信号,采用闭环流量体模和 Sonix Tablet 扫描仪用事先优化的传输参数完成图像采集,两种超声对比剂采用 Definity(0.1 mL)和 Sonazoid(0.2 mL),分别加入 750 mL 等渗稀释剂,碘对比剂 Visipaque 被制成临床所使用的浓度(0.75 mL 和 3 mL)。亚谐波振幅为 0.5 MHz 带宽附近二分之一传输频率的平均值。结果表明,相对于基线来说,Definity 和 Sonazoid 微泡亚谐波信号的增强分别达到  $(13.2 \pm 0.3)$  dB 和  $(15.6 \pm 0.8)$  dB。当 Visipaque 含量为 0.75 和 3 mL 时,Definity 微泡的亚谐波振幅分别减低  $(4.8 \pm 0.3)$  dB 和  $(5.5 \pm 0.3)$  dB, Sonazoid 微泡的亚谐波振幅分别降低  $(4.6 \pm 0.8)$  dB 和  $(4.6 \pm 0.8)$  dB。因此,加入碘对比剂会降低超声微泡的亚谐波振幅,但其下降程度不随碘对比剂浓度变化而变化。

## 核医学

Wang 等将 58 例新诊断为弥漫性大 b 细胞淋巴瘤的患者纳入研究,蒽环类药物治疗前后均行静息门控心肌灌注成像(gated myocardial perfusion imaging, GMPI)。使用 Emory Cardiac Toolbox TM 程序自动计算心肌灌注异常的范围(Extent)、左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、舒张末期和收缩末期容积、峰值充盈率(PFR)、左心室收缩期和舒张期同步参数如相位标准差(SD)、相位直方图带宽(BW)。蒽环类药物相关心脏毒性(anthracycline treat related cardiotoxicity, ATRC)被定义为有症状心力衰竭、心源性死亡、心律失常或梗死、LVEF 较基线下降  $>15\%$ 。结果显示 58 例患者中有 14 例发生 ATRC,蒽环类药物治疗后左室舒张期不同步以及 LVEF 下降均为 ATRC 的独立预测指标。

Zhu 等收集了 141 名接受放疗的食管癌患者的 PET/CT 诊断数据集,手工标记了 651 个淋巴结大体肿瘤体积(lymph node gross tumor volume, GTV-LN)。通过基于距离的门控函数将其分为“肿瘤-近端”和“肿瘤-远端”两类,然后建立了一个多分支深度学习网络,其包含一个共享的编码器和两个独立的解码器,分别检测和分割 GTV-LN 子类别。将数据随机分成 60%、10%和 30%进行训练、验证和测试。结果表明该方法在(0.1, 0.5)的精度范围内达到了了 82%的平均敏感度,略高于文献报道中医生手动识别和分割的敏感度(80%),且可以降低操作者的主观性与可变性。

(收稿日期:2021-01-28)