



减少CT图像中金属伪影的研究进展

苏丹阳, 侯平, 张浩然, 马渊博, 刘金龙, 杨晓鹏

Research Progress on Reducing Metal Artifacts in CT Imaging

SU Danyang, HOU Ping, ZHANG Haoran, MA Yuanbo, LIU Jinlong, and YANG Xiaopeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

能谱CT单能量成像结合MAR技术降低金属植入物伪影的体模研究

Utility of Spectral CT Monochromatic Imaging with Metal Artifacts Reduction (MAR) for the Reduction of Metal Artifacts of Embolization Coil Implants

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 529-539

工业X射线CT中基于深度学习的射束硬化伪影抑制方法

Deep Learning Based Beam Hardening Artifact Reduction in Industrial X-ray CT

CT理论与应用研究. 2018, 27(2): 227-240

双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209-216

可同时抑制多种图像伪影的最优骨校正

An Optimal Bone Correction Capable of Simultaneously Suppressing Various Types of Image Artifacts

CT理论与应用研究. 2018, 27(3): 301-314

基于特征学习的低剂量CT成像算法研究进展

Research Progress of Low Dose CT Imaging Based on Feature Learning

CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 393-406

基于X射线连续谱的光子计数探测器能量标定方法

Energy Calibration Method of the Photon Counting Detector Based on Continuous X-ray Spectrum

CT理论与应用研究. 2018, 27(3): 363-372



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

苏丹阳, 侯平, 张浩然, 等. 减少 CT 图像中金属伪影的研究进展[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(3): 499-505. DOI:10.15953/j.ctta.2024.023.
SU D Y, HOU P, ZHANG H R, et al. Research Progress on Reducing Metal Artifacts in CT Imaging[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(3): 499-505.
DOI:10.15953/j.ctta.2024.023. (in Chinese).

减少 CT 图像中金属伪影的研究进展

苏丹阳^a, 侯平^a, 张浩然^a, 马渊博^a, 刘金龙^a, 杨晓鹏^b

郑州大学第一附属医院 a) 放射科; b) 医学装备部, 郑州 45000

摘要: 颅内动脉瘤栓塞术、口腔金属置入物、脊柱内固定物以及髋关节置换术等金属置入物在临床中的应用日益增加。采用 CT 图像对金属置入物术后患者进行评估时产生的金属伪影会使 CT 图像无法清晰显示金属-骨界面及邻近的组织结构, 影响医生诊断的精准性。随着 CT 的发展, 去金属伪影技术和虚拟单能量成像技术等手段有助于减少 CT 图像中的金属伪影, 深度学习重建算法和光子计数 CT 的出现为金属置入物术后的精准评估提供更加可靠的依据。本文就减少 CT 图像中金属伪影的研究进展作一综述。

关键词: 深度学习; CT 图像; 金属伪影; 单能量成像; 光子计数 CT

DOI:10.15953/j.ctta.2024.023 中图分类号: T 18; TP 391.41; R 814 文献标识码: A

Research Progress on Reducing Metal Artifacts in CT Imaging

SU Danyang^a, HOU Ping^a, ZHANG Haoran^a, MA Yuanbo^a, LIU Jinlong^a, YANG Xiaopeng^b

a).Department of Radiology; b).Medical Equipment Department, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Intracranial aneurysm embolization, oral metal implants, spinal internal fixation, hip replacement, and other metal implants are increasingly used in clinical practice. Metal artifacts generated by computed tomography (CT) images during the evaluation of patients after placement of metal implants will prevent CT images from clearly showing the metal-bone interface and the adjacent tissue structure, which affects the accuracy of doctors' diagnosis. With the development of CT, metal artifact reduction technology and virtual monoenergetic imaging technology are helpful to reduce metal artifacts in CT imaging. The emergence of deep learning reconstruction algorithms and photon counting CT provides a more reliable basis for the accurate evaluation of metal implants after surgery. This paper reviews the progress of research on reducing metal artifacts in CT imaging.

Keywords: deep learning; CT imaging; metal artifact; monoenergetic imaging; photon counting CT

CT 重建后的图像常因金属置入物的存在而产生明暗相间的金属伪影, 难以清晰地显示金属-正常组织界面及邻近的组织结构, 进而影响医生对术后情况的判断和后续治疗的决策^[1-4]。临床医生需要质量较高的图像以减少金属置入物术后金属伪影带来的干扰, CT 图像中的金属伪影去除 (metal artifacts reduction, MAR) 技术和虚拟单能量成像 (virtual monoenergetic image, VMI) 均可降低金属伪影, 两种技术的结合有助于进一步减少金属伪影的影响。

随着深度学习重建 (deep learning reconstruction, DLR) 算法的快速发展和光子计数 CT 的出现, 将进一步改善金属伪影对周围组织的影响。本文结合文献就减少 CT 图像中金属伪影的研究进展作综述。

1 金属伪影产生的原因

CT 金属伪影常见的原因包括 X 线束硬化、散射、光子饥饿和部分容积效应, 是多种因素共同作用的结果^[5-6]。传统 CT 产生混合能量的 X 线穿过人体时, 低能光子被吸收, 高能光子则直接通过, 穿

收稿日期: 2024-02-01。

第一作者: 苏丹阳, 女, 医学技术专业硕士研究生, 主要从事 CT 对置入物的研究, E-mail: s839671366@163.com。

通信作者: 杨晓鹏[✉], 男, 教授、硕士生导师, 主要从事影像和骨修复方面的研究, E-mail: 13837141925@163.com。

过人体的 X 线的平均能量增加, 表现为明暗相间的条纹伪影, 即 X 线束硬化。康普顿散射会使部分光子无法被探测器接收, 从而在金属置入物周围形成混杂密度的伪影。当 X 线穿过人体后光子被大量吸收, 探测器只能接收到少量光子形成光子饥饿, 表现为沿金属置入物长轴方向的条状低密度伪影。而部分容积效应是由探测器引起, 在 CT 扫描时, 探测器将检测到的金属置入物和周围组织的平均值作为探测器的输出信号, 因此在重建出的 CT 图像上金属置入物与周围组织分界模糊, 出现暗状条纹伪影。

随着探测器不断进步, 采集层厚越来越薄, 部分容积效应对金属伪影产生的影响越来越小。

2 影响金属伪影产生的因素

金属置入物的密度、厚度、方向以及管电压、管电流、螺距和扫描层厚等参数都能影响金属伪影的严重程度。

金属置入物在 CT 图像上产生的金属伪影的范围和密度值成正比, 高密度的金属产生的伪影范围大, 低密度的金属产生的金属伪影则要小的多^[7]。其次, CT 图像上的金属伪影与金属置入物的厚度有关, 同一材质的髋关节假体和脊柱内固定物, 前者产生的金属伪影更严重^[8]。此外, 金属置入物与 CT 扫描的平面相垂直时, 产生的横断面积最小, 金属伪影的范围最小。而且通过对采集协议的优化也可在一定程度上减少 CT 图像中的金属伪影^[9]。

3 减少金属伪影的方法

3.1 CT 扫描参数的优化在减少金属伪影中的应用

CT 扫描参数优化是去除金属伪影的常用方法, 通过增加管电压、管电流、使用窄准直器、减小扫描螺距和增加扫描层厚等参数, 可在数据采集阶段减少金属伪影。但是单纯优化 CT 扫描参数对减少金属伪影的效果有限, 难以满足临床精准诊断的要求^[10-12]。

3.2 后处理技术在减少金属伪影中的应用

CT 扫描参数的优化为多种后处理技术进一步减少金属伪影奠定了基础。MAR 技术是减少金属伪影的研究热点; 单球管高低双能瞬时切换 CT、双层探测器 CT 以及双源 CT 得到的 VMI 技术广泛用于减少金属伪影^[13]; 近几年的 DLR 算法和光子

计数 CT 对改善金属置入物患者术后的 CT 图像质量也有帮助。

3.2.1 MAR 技术

MAR 技术在减小 CT 金属伪影对周围组织的影响方面展示出显著效果^[2,14-15]。目前, 常见的 MAR 技术包括: Smart MAR (GE 公司)、iMAR (Siemens 公司)、O-MAR (Philips 公司) 及 SEMAR (Canon 公司)^[16-19]。

Smart MAR 技术通过密度阈值识别原始图像中的金属伪影, 并利用迭代重建算法, 以未受损的投影数据为基础, 用修正后的数据替代因金属伪影而丢失的数据, 进而与原始图像融合, 有效减少金属伪影的干扰^[18]。iMAR 技术通过综合运用射线束硬化矫正、线性内插值以及自适应正弦图修复和分频去金属伪影等多种迭代计算来减少图像中的条状伪影, 同时它还对受影响的组织 CT 值校正使之更接近于无金属置入物情况下的真实情况^[18,20]。O-MAR 技术是通过图像内的物质结构进行重新定义和分类, 对所定义的不同组织的投影数据进行反复的迭代运算, 精准识别并剔除金属伪影对应的投影数据, 最终得到高质量的重建图像, 减少新伪影的产生^[16,18]。SEMAR 技术则建立在单能滤波反投影算法 (filter back projection, FBP) 的基础上, 通过将金属物体的投影轨迹与反投影伪影影像的组织进行线性内插和转换, 实现去伪影的目的^[19]。

尽管 MAR 技术在减少金属伪影方面表现出色, 但也有可能引入新的伪影, 甚至对图像质量造成不利影响。因此, 在实际应用中, 需要根据扫描部位的特点和需求, 谨慎选择并应用合适的 MAR 技术。

3.2.2 VMI 技术

VMI 技术为减少金属伪影提供了又一有效手段。VMI 技术通过对原始数据的处理和解析获得不同能量水平的 VMI, 包括 40~140keV 单能量图像 (GE 公司)、40~190keV 单能量图像 (Siemens 公司) 和 40~200keV 单能量图像 (Philips 公司)^[3,21-22]。

随着单能量重建级别的升高, X 线束硬化伪影的影响得到有效降低, 使伪影内组织 CT 值更接近真实 CT 值, 同时避免了新伪影产生^[21,23]。然而, 实际应用中, 由于 CT 设备的差异以及金属置入物的密度、厚度、形状等等因素的不同, 最佳 keV 的选择也有所不同。多数情况下, 推荐使用高能量段最大程度地减少金属伪影^[4,24]。但在某些情况下, 低 keV 条件可能更有利于不同组织结构之间的对

比和病灶的检出。因此,在选择使用 VMI 技术时,需综合考虑多种因素,以达到最佳的图像质量和诊断效果。

3.2.3 DLR 算法

DLR 算法通过深度学习模型的学习和优化,能够更精准地识别和修复图像中的金属伪影,提高图像的清晰度和准确性,同时尽可能降低辐射剂量和噪声水平^[25-28]。目前 3 家 CT 供应商发布了 DLR 算法^[25]: TrueFidelity (GE 公司)、AiCE (Canon 公司)、Precise Image (Philips 公司),这些算法各具特色, TrueFidelity 是基于 FBP 图像作为目标数据进行训练的,保留了类似于 FBP 的噪声纹理、清晰度和伪影属性; AiCE 算法则采用高剂量基于模型的迭代重建 (model-based iterative reconstruction, MBIR) 数据作为训练目标,经过更多的迭代次数以达到最佳的图像质量;而 Precise Image 则以 FBP 图像为数据集,基于卷积神经网络算法训练。

总而言之,基于 DLR 算法的 MAR 技术或者 VMI 技术比非 DLR 更能有效地去除金属伪影带来的影响,提高图像质量,但仍需更大规模的临床研究来全面评估不同深度学习算法的性能^[25-28]。

3.2.4 多种技术联合

多项研究表明,单一的技术在处理金属伪影时往往存在局限性。例如,以 MAR 技术为例,对于某种特定情况,它可能无法完全消除金属伪影,或因过度矫正引入新的伪影,不能单独作为诊断依据^[14];而 VMI 技术虽然在高 keV 条件下可有效降低金属硬化伪影,但同时也可能导致组织对比度的降低,不利于软组织显示^[29]。与单一的后处理技术相比, MAR 技术与 VMI 技术的联合应用能够进一步减少金属伪影,对患者术后的观察具有重要的临床意义^[8,14,30-31]。而且基于 DLR 算法的后处理技术在减少金属伪影方面取得了更较好的效果^[25-28]。

综上所述,多种技术联合有望成为减少金属伪影新的研究方向,具有广阔的应用前景。

3.3 光子计数 CT 在减少金属伪影中的应用

光子计数 CT 利用半导体材料的直接转换将入射的光子转换为电信号,同时提供丰富的光谱信息。这一特性使其具备减少金属伪影的潜力,通过减少散射和伪影的产生,图像的质量得以进一步提升。特别是光子计数 CT 通过 VMI 技术在处理低原子序数和低穿透长度金属类型中的金属伪影方面展现了显著的效果^[32]。

此外,光子计数 CT 联合 MAR 技术为减少脑成像中线圈相关伪影提供一种新的选择^[33]。尽管光子计数 CT 仍处于发展阶段,但其与多种后处理技术的结合应用在减少金属伪影方面具有巨大潜力。

4 减少 CT 金属伪影的临床应用

4.1 颅内动脉瘤栓塞术

颅内动脉瘤栓塞术是治疗颅内动脉瘤的重要方法,具有微创、损伤小等优点,但复发率高,需长期随访^[34]。MAR 技术能有效去除颅内动脉瘤栓塞术后金属伪影,辅助观察邻近血管和术后恢复情况^[34-35]。关于最佳单能量区间的选择,有研究认为 MAR 技术联合 60~65 keV 单能量区间为术后复查的理想范围^[36],而另一研究则认为 MAR 技术联合 70~90 keV 单能量区间为最佳观察范围^[37],这可能与采用的 CT 设备、应用的弹簧圈材质以及使用的对比剂浓度和用量不同有关。此外,光子计数 CT 联合 MAR 技术为减少线圈相关伪影提供一种改进的选择^[33]。

MAR 技术、VMI 技术以及光子计数 CT 在颅内动脉瘤栓塞术后的评估中发挥着重要的作用,不同的最佳单能量的选择有助于减少金属伪影和最优化显示血管。

4.2 口腔金属置入物

当口腔内存在金属置入物时,进行颌面或头颈部 CT 检查,金属诱导的条纹伪影不可避免^[38]。尽管 VMI 技术在减少口腔金属置入物伪影方面有一定价值,但其效果相对有限。相比之下, MAR 技术在提高口腔内组织显示程度上表现出色^[15],能够显著提高头颈部 CT 的图像质量、诊断信心和病灶检测能力^[39]。而 MAR 技术联合 VMI 技术可进一步减少伪影^[31]。

此外,DLR 联合 MAR 技术能够改善口腔金属置入物患者 CT 图像中的噪声、伪影指数、图像整体质量及显示病灶质量,且均优于单独的 MAR 技术^[40]。

但对于口腔金属置入物 CT 图像而言,存在无法完全去除金属伪影的可能性。因此,仍需进行更深入的研究以期达到理想的成像效果。

4.3 脊柱内固定物

椎弓根螺钉常作为脊柱手术的首选内固定装置,然而,大量的金属伪影会影响图像观察,VMI 技术在高 keV 能量成像下减少椎弓根螺钉置入患者

金属伪影的效果优于常规 CT 图像^[41-42]。但在 VMI 图像基础上结合 MAR 技术, 易引入大量影响诊断的新伪影^[8,42]。

值得一提的是, 光子计数 CT 在脊柱内固定物患者的术后观察极具前景, CT 图像清晰度明显提高, 图像噪声明显降低, 辐射剂量下降^[43]。因此, 对于脊柱内固定物这类置入物而言, 使用高能量的 VMI 技术效果优越, 未来结合光子计数 CT 和 DLR 算法来进一步提高图像质量。

4.4 髋关节置换术

随着股骨颈骨折、股骨头坏死、髋关节炎等疾病发病率升高, 人工髋关节置换术发挥着举足轻重的作用^[44]。然而, 人工置换的髋关节结构复杂、密度硬度高、体积较大, 在 CT 图像上表现为面积大且严重的伪影。VMI 技术仅能够在一定程度上改善轻中度伪影^[45]。而 MAR 技术在减少髋关节置换术后的金属伪影的效果十分显著^[10,14], CT 图像质量明显提高, 使得术后并发症以及受伪影干扰的病变显示更为清晰^[14,46]。更值得一提的是, MAR 技术与 VMI 技术联合使用可显著减少髋关节置换术患者的金属伪影, 能够发挥最强的伪影减低能力^[8,30,47]。

因此, MAR 技术、VMI 技术的联合应用将在髋关节置换术后的影像诊断中占据越来越重要的地位。未来, 这些技术还有望与 DLR 算法或光子计数 CT 等前沿技术相结合, 为骨科疾病的影像诊断开辟更为广阔的应用前景。

4.5 其他置入物

尽管已有一些方法针对以上金属置入物在 CT 图像中产生的伪影, 但针对其他类型的金属置入物的金属伪影的应用相对较少。VMI 技术联合 MAR 技术在减少肱骨内固定骨折伪影方面取得了显著成效^[11]。而相较于 VMI 技术, MAR 技术在减少膝关节置换物伪影方面表现得更为出色^[48]。此外, 在减少消化道异物、胸部穿刺活检、支架置入术后等引起的 CT 金属伪影问题上也有所研究^[49-51]。

DLR 算法以及光子计数 CT 在减少其他部位的金属伪影方面有广泛的应用前景。

5 局限性

MAR 技术可能导致对金属置入物大小的低估, 并可能会引入新的伪影。VMI 技术在投影数据的采集过程中存在噪声造成图像数据不能完全消除 X 线束硬化伪影的影响。DLR 算法需要更大规模

的临床研究来评估不同设备 DLR 算法的性能。光子计数 CT 在减少金属置入物的伪影方面的研究较少, 无法进一步研究不同置入物类型对图像质量的影响。此外, 金属置入物的材质、大小、形状等问题, 在未来的研究中应充分考虑并结合最新的技术进一步完善。

除此之外, 感兴趣区的位置、大小和层面的选择只能靠操作者主观判断金属伪影严重的区域进行划分, 在一定程度上影响了结果的客观性。

6 总结与展望

综上所述, MAR 技术、VMI 技术是目前有效减少金属伪影后处理技术, MAR 和 VMI 技术联合减少金属伪影的效果更好。近年来, DLR 算法以及光子计数 CT 成为减少金属伪影的研究热点, 有助于进一步提高图像质量, 在低辐射剂量下有效减少金属伪影, 提高金属置入术后的诊断信心。更重要的是应根据金属的密度、厚度和形状以及它在 CT 扫描平面上的方向选择合适的技术减少金属伪影。未来应做更加深入完整的探索, 并致力于开发一种针对特定金属伪影模式和特定解剖结构的减少金属伪影的方法。

参考文献

- [1] 李昊翔, 朱凯, 孙重阳, 等. 宝石能谱 CT 在减少金属伪影方面的应用进展[J]. 中国医药导报, 2015, 12(11): 42-45.
LI H X, ZHU K, SUN C Y, et al. Advances in the application of gemstone spectral CT in reducing metal artifacts[J]. China Medicine Guide, 2015, 12(11): 42-45. (in Chinese).
- [2] JEONG S, KIM S H, HWANG E J, et al. Usefulness of a metal artifact reduction algorithm for orthopedic implants in abdominal CT: Phantom and clinical study results[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2015, 204(2): 307-317. DOI:10.2214/ajr.14.12745.
- [3] PESSIS E, CAMPAGNA R, SVERZUT J M, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: Reduction of metal artifacts at CT[J]. *RadioGraphics*, 2013, 33(2): 573-583. DOI:10.1148/rg.332125124.
- [4] LEE Y H, PARK K K, SONG H T, et al. Metal artefact reduction in gemstone spectral imaging dual-energy CT with and without metal artefact reduction software[J]. *European Radiology*, 2012, 22(6): 1331-1340. DOI:10.1007/s00330-011-2370-5.
- [5] 汪涛, 夏文军, 赵云松, 等. CT 金属伪影去除研究进展[J]. *中国体视学与图像分析*, 2020, 25(3): 207-223. DOI:10.13505/j.1007-1482.2020.25.03.001.

- WANG T, XIA W J, ZHAO Y S, et al. Advances in metal artifact removal in CT[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2020, 25(3): 207-223. DOI:10.13505/j.1007-1482.2020.25.03.001. (in Chinese).
- [6] KOHYAMA S, YOSHII Y, OKAMOTO Y, et al. Advances in bone joint imaging-metal artifact reduction[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(12). DOI:10.3390/diagnostics12123079.
- [7] 魏亦龙, 崔钢, 张跃, 等. 口腔不同金属材料全冠修复体 CT 成像伪影的实验研究[J]. *海南医学院学报*, 2013, 19(12): 1764-1766, 1770. DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.2013.12.166.
- WEI Y L, CUI G, ZHANG Y, et al. Experimental study on CT imaging artifacts of dental crowns made of different metal materials[J]. *Journal of Hainan Medical College*, 2013, 19(12): 1764-1766, 1770. DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.2013.12.166. (in Chinese).
- [8] 黄钟杰, 曹楚瑜, 刘源. 宝石能谱 CT 去除金属伪影软件减轻脊柱和髋关节植入金属物伪影的价值[J]. *汕头大学医学院学报*, 2014, 27(2): 115-118. DOI:10.13401/j.cnki.jsunc.2014.02.024.
- HUANG Z J, CAO C Y, LIU Y. The value of gemstone spectral CT metal artifact removal software in reducing metal artifacts of spinal and hip implants[J]. *Journal of Shantou University Medical College*, 2014, 27(2): 115-118. DOI:10.13401/j.cnki.jsunc.2014.02.024. (in Chinese).
- [9] BARRETT J F, KEAT N. Artifacts in CT: Recognition and avoidance[J]. *Radiographics*, 2004, 24(6): 1679-1691. DOI:10.1148/rg.246045065.
- [10] NEROLADAKI A, MARTIN S P, BAGETAKOS I, et al. Metallic artifact reduction by evaluation of the additional value of iterative reconstruction algorithms in hip prosthesis computed tomography imaging[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(6): e14341. DOI:10.1097/md.00000000000014341.
- [11] WINKLHOFER S, BENNINGER E, SPROSS C, et al. CT metal artefact reduction for internal fixation of the proximal humerus: Value of mono-energetic extrapolation from dual-energy and iterative reconstructions[J]. *Clinical Radiology*, 2014, 69(5): e199-206. DOI:10.1016/j.crad.2013.12.011.
- [12] NIKBIN A, DALILI KAJAN Z, TARAMSARI M, et al. Effect of object position in the field of view and application of a metal artifact reduction algorithm on the detection of vertical root fractures on cone-beam computed tomography scans: An in vitro study[J]. *Imaging Science in Dentistry*, 2018, 48(4): 245-254. DOI:10.5624/isd.2018.48.4.245.
- [13] JOHNSON T R, KRAUSS B, SEDLMAIR M, et al. Material differentiation by dual energy CT: Initial experience[J]. *European Radiology*, 2007, 17(6): 1510-1517. DOI:10.1007/s00330-006-0517-6.
- [14] HAN S C, CHUNG Y E, LEE Y H, et al. Metal artifact reduction software used with abdominopelvic dual-energy CT of patients with metal hip prostheses: Assessment of image quality and clinical feasibility[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2014, 203(4): 788-795. DOI:10.2214/ajr.13.10980.
- [15] KIDOH M, NAKAURA T, NAKAMURA S, et al. Reduction of dental metallic artefacts in CT: Value of a newly developed algorithm for metal artefact reduction (O-MAR)[J]. *Clinical Radiology*, 2014, 69(1): e11-16. DOI:10.1016/j.crad.2013.08.008.
- [16] LI H, NOEL C, CHEN H, et al. Clinical evaluation of a commercial orthopedic metal artifact reduction tool for CT simulations in radiation therapy[J]. *Medical Physics*, 2012, 39(12): 7507-7517. DOI:10.1118/1.4762814.
- [17] AXENTE M, PAIDI A, Von EYBEN R, et al. Clinical evaluation of the iterative metal artifact reduction algorithm for CT simulation in radiotherapy[J]. *Medical Physics*, 2015, 42(3): 1170-1183. DOI:10.1118/1.4906245.
- [18] WAGENAAR D, Van der GRAAF E R, Van der SCHAAF A, et al. Quantitative comparison of commercial and non-commercial metal artifact reduction techniques in computed tomography[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0127932. DOI:10.1371/journal.pone.0127932.
- [19] 金大永, 李笑石, 耿纪刚, 等. SEMAR 与 AIDR 3D 去金属伪影算法相结合在髋关节置换术后 CT 检查中的临床应用价值[J]. *临床医学研究与实践*, 2022, 7(2): 82-85, 102. DOI:10.19347/j.cnki.2096-1413.202202023.
- JIN D Y, LI X S, GENG J G, et al. Clinical application value of SEMAR combined with AIDR 3D metal artifact reduction algorithm in CT examination after hip replacement[J]. *Clinical Medical Research & Practice*, 2022, 7(2): 82-85, 102. DOI:10.19347/j.cnki.2096-1413.202202023. (in Chinese).
- [20] LELL M M, MEYER E, KUEFNER M A, et al. Normalized metal artifact reduction in head and neck computed tomography[J]. *Investigative Radiology*, 2012, 47(7): 415-421. DOI:10.1097/RLI.0b013e3182532f17.
- [21] YU L, LENG S, MCCOLLOUGH C H. Dual-energy CT-based monochromatic imaging[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2012, 199(S5): s9-s15. DOI:10.2214/ajr.12.9121.
- [22] ZHOU C, ZHAO Y E, LUO S, et al. Monoenergetic imaging of dual-energy CT reduces artifacts from implanted metal orthopedic devices in patients with fractures[J]. *Academic Radiology*, 2011, 18(10): 1252-1257. DOI:10.1016/j.acra.2011.05.009.
- [23] KAZA R K, PLATT J F, COHAN R H, et al. Dual-energy CT with single- and dual-source scanners: Current applications in evaluating the genitourinary tract[J]. *Radiographics*, 2012, 32(2): 353-369. DOI:10.1148/rg.322115065.
- [24] HAKVOORT E T, WELLENBERG R H H, STREEKSTRA G J. Quantifying near metal visibility using dual energy computed tomography and iterative metal artifact reduction in a fracture phantom[J]. *Physica Medica*,

- 2020, 69: 9-18. DOI:10.1016/j.ejmp.2019.11.006.
- [25] KOETZIER L R, MASTRODICASA D, SZCZYKU-TOWICZ T P, et al. Deep learning image reconstruction for CT: Technical principles and clinical prospects[J]. *Radiology*, 2023, 306(3): e221257. DOI:10.1148/radiol.221257.
- [26] BUSI M, KEHL C, FRISVAD J R, et al. Metal artifact reduction in spectral X-ray CT using spectral deep learning[J]. *Journal of Imaging*, 2022, 8(3). DOI:10.3390/jimaging8030077.
- [27] GONG H, MARSH J F, D'SOUZA K N, et al. Deep-learning-based direct synthesis of low-energy virtual monoenergetic images with multi-energy CT[J]. *Journal of Medical Imaging (Bellingham)*, 2021, 8(5): 052104. DOI:10.1117/1.Jmi.8.5.052104.
- [28] LIANG K, ZHANG L, YANG H, et al. Metal artifact reduction for practical dental computed tomography by improving interpolation-based reconstruction with deep learning[J]. *Medical Physics*, 2019, 46(12): e823-e834. DOI:10.1002/mp.13644.
- [29] PARK J, KIM S H, HAN J K. Combined application of virtual monoenergetic high keV images and the orthopedic metal artifact reduction algorithm (O-MAR): Effect on image quality[J]. *Abdominal Radiology (New York)*, 2019, 44(2): 756-765. DOI:10.1007/s00261-018-1748-0.
- [30] 孙彤彤, 黄熙菘, 罗腾龙, 等. 双层探测器光谱 CT 虚拟单能量成像联合去除植入物金属伪影用于减少置换髋关节假体金属伪影[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(7): 1084-1088. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.07.030.
- SUN T T, HUANG X K, LUO T L, et al. Virtual monoenergetic imaging combined with orthopedic metal artifact reduction for reducing metal artifacts of hip prosthesis based on dual-layer detector spectral CT[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2023, 39(7): 1084-1088. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.07.030. (in Chinese).
- [31] BONGERS M N, SCHABEL C, THOMAS C, et al. Comparison and combination of dual-energy- and iterative-based metal artefact reduction on hip prosthesis and dental implants[J]. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0143584. DOI:10.1371/journal.pone.0143584.
- [32] ANHAUS J A, SCHMIDT S, KILLERMANN P, et al. Iterative metal artifact reduction on a clinical photon counting system-technical possibilities and reconstruction selection for optimal results dependent on the metal scenario[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2022, 67(11). DOI:10.1088/1361-6560/ac71f0.
- [33] SCHMITT N, WUCHERPFENNIG L, ROTKOPF L T, et al. Metal artifacts and artifact reduction of neurovascular coils in photon-counting detector CT versus energy-integrating detector CT - in vitro comparison of a standard brain imaging protocol[J]. *European Radiology*, 2023, 33(2): 803-811. DOI:10.1007/s00330-022-09073-y.
- [34] 张恒龙, 杨新国, 田昭俭, 等. O-MAR 重建在去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影的价值[J]. *实用医学影像杂志*, 2019, 20(3): 217-220. DOI:10.16106/j.cnki.cn14-1281/r.2019.03.001.
- ZHANG H L, YANG X G, TIAN Z J, et al. Value of O-MAR reconstruction in removing metal artifacts after coil embolization of intracranial aneurysms[J]. *Journal of Practical Medical Imaging*, 2019, 20(3): 217-220. DOI:10.16106/j.cnki.cn14-1281/r.2019.03.001. (in Chinese).
- [35] DUNET V, BERNASCONI M, HAJDU S D, et al. Impact of metal artifact reduction software on image quality of gemstone spectral imaging dual-energy cerebral CT angiography after intracranial aneurysm clipping[J]. *Neuroradiology*, 2017, 59(9): 845-852. DOI:10.1007/s00234-017-1871-6.
- [36] 余娜, 严敏, 傅浪舟, 等. 应用能谱 CT 技术去除颅内动脉瘤弹簧圈栓塞术后金属伪影[J]. *第三军医大学学报*, 2020, 42(20): 2069-2074. DOI:10.16016/j.1000-5404.202005207.
- YU N, YAN M, FU L Z, et al. Removal of metal artifacts after coil embolization of intracranial aneurysms using spectral CT[J]. *Journal of the Third Military Medical University*, 2020, 42(20): 2069-2074. DOI:10.16016/j.1000-5404.202005207. (in Chinese).
- [37] 董鑫, 吕国土, 刘伟, 等. 能谱 CT 的 MONO 成像联合 MARs 技术在颅内弹簧圈植入物伪影的应用研究[J]. *临床放射学杂志*, 2016, 35(5): 794-798. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2016.05.037.
- DONG X, LV G S, LIU W, et al. Application effects of energy spectral CT mono imaging technology united with MARs in removing artifacts of intracranial spring coil implant[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2016, 35(5): 794-798. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2016.05.037. (in Chinese).
- [38] ABDOLI M, AY M R, AHMADIAN A, et al. Reduction of dental filling metallic artifacts in CT-based attenuation correction of PET data using weighted virtual sinograms optimized by a genetic algorithm[J]. *Medical Physics*, 2010, 37(12): 6166-6677. DOI:10.1118/1.3511507.
- [39] FELDHAUS F, BÖNING G, JONCZYK M, et al. Metallic dental artifact reduction in computed tomography (Smart MAR): Improvement of image quality and diagnostic confidence in patients with suspected head and neck pathology and oral implants[J]. *European Journal of Radiology*, 2019, 118: 153-160. DOI:10.1016/j.ejrad.2019.07.015.
- [40] 唐丽, 刘星, 侯平, 等. 深度学习重建联合 Smart 去金属伪影算法对颈部 CT 图像中口腔金属植入物伪影的影响[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(11): 1731-1735. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.11.031.
- TANG L, LIU X, HOU P, et al. Effect of deep learning reconstruction combined with Smart metal artifact reduction algorithm on artifacts of dental metal implants in

- neck CT images[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2023, 39(11): 1731-1735. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2023.11.031. (in Chinese).
- [41] DONG Y, SHI A J, WU J L, et al. Metal artifact reduction using virtual monochromatic images for patients with pedicle screws implants on CT[J]. *European Spine Journal*, 2016, 25(6): 1754-1763. DOI:10.1007/s00586-015-4053-4.
- [42] WANG Y, QIAN B, LI B, et al. Metal artifacts reduction using monochromatic images from spectral CT: Evaluation of pedicle screws in patients with scoliosis[J]. *European Journal of Radiology*, 2013, 82(8): e360-e366. DOI:10.1016/j.ejrad.2013.02.024.
- [43] RAU A, STRAEHLE J, STEIN T, et al. Photon-counting computed tomography (PC-CT) of the spine: Impact on diagnostic confidence and radiation dose[J]. *European Radiology*, 2023, 33(8): 5578-5586. DOI:10.1007/s00330-023-09511-5.
- [44] 张晓军. 半髌与全髌关节置换术在老年股骨颈骨折治疗中的疗效对比[J]. *中国药物与临床*, 2020, 20(2): 231-233.
- ZHANG X J. A comparative study of hemiarthroplasty and total hip arthroplasty in the treatment of femoral neck fractures in the elderly[J]. *Chinese Remedies & Clinics*, 2020, 20(2): 231-233. (in Chinese).
- [45] WELLENBERG R H, BOOMSMA M F, Van OSCH J A, et al. Quantifying metal artefact reduction using virtual monochromatic dual-layer detector spectral CT imaging in unilateral and bilateral total hip prostheses[J]. *European Journal of Radiology*, 2017, 88: 61-70. DOI:10.1016/j.ejrad.2017.01.002.
- [46] KIM Y J, CHA J G, KIM H, et al. Dual-energy and iterative metal artifact reduction for reducing artifacts due to metallic hardware: A loosening hip phantom study[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2019, 212(5): 1106-1111. DOI:10.2214/ajr.18.20413.
- [47] 赵立, 胡志海, 刘笑颜, 等. 对比单能量图像和单能去金属伪影技术在髌关节和膝关节置换术后的应用价值[J]. *医学影像学杂志*, 2022, 32(9): 1641-1645.
- ZHAO L, HU Z H, LIU X Y, et al. Comparison of the application value of monoenergetic imaging and monoenergetic metal artifact reduction technology in hip and knee arthroplasty[J]. *Journal of Medical Imaging*, 2022, 32(9): 1641-1645. (in Chinese).
- [48] KIDOH M, UTSUNOMIYA D, ODA S, et al. CT venography after knee replacement surgery: Comparison of dual-energy CT-based monochromatic imaging and single-energy metal artifact reduction techniques on a 320-row CT scanner[J]. *Acta Radiologica Open*, 2017, 6(2): 2058460117693463. DOI:10.1177/2058460117693463.
- [49] 马双, 杨楠, 祁昕, 等. 能谱 CT 去伪影技术在儿童消化道金属异物扫描中的应用评估[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2023, 34(12): 878-882.
- MA S, YANG N, QI X, et al. Application and evaluation of spectral CT artifact reduction technology in the scanning of metallic foreign bodies in the digestive tract of children[J]. *Journal of China Clinic Medical Imaging*, 2023, 34(12): 878-882. (in Chinese).
- [50] 何亮, 唐彩银, 张继, 等. 能谱 CT 金属伪影抑制算法在胸部穿刺活检中的应用价值[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2023, 21(11): 50-52. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.11.016.
- HE L, TANG C Y, ZHANG J, et al. Application value of metal artifact reduction algorithm in spectral CT chest biopsy[J]. *Chinese Journal of CT and MRI*, 2023, 21(11): 50-52. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.11.016. (in Chinese).
- [51] 杨帆, 曾懿. 双能量 CT 虚拟单能谱成像技术在 TIPS 术后支架评估中的应用[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2019, 17(3): 266-268. DOI:10.3969/j.issn.1672-0512.2019.03.014.
- YANG F, ZENG Y. Application of virtual monoenergetic spectral imaging of dual-energy CT in stent evaluation after TIPS[J]. *Chinese Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Imaging*, 2019, 17(3): 266-268. DOI:10.3969/j.issn.1672-0512.2019.03.014. (in Chinese).