

低剂量光子计数CT在放疗随访中的挑战与优势

何子寅

承德医学院研究生学院, 河北 承德

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月6日; 发布日期: 2025年12月16日

摘要

本文综述了低剂量光子计数CT在肿瘤放疗随访中的应用价值、当前挑战与未来前景。PCCT凭借其光子计数探测器的技术原理, 实现了超高空间分辨率与多参数能谱成像, 在显著降低辐射剂量的同时, 为放疗随访中的关键临床难题提供了解决方案。这些优势具体体现在: 有效抑制金属植入物相关伪影、提升放射性纤维化与肿瘤复发的鉴别能力、以及增强对亚毫米微小转移灶的早期探测灵敏度。然而, 该技术仍面临探测器物理局限(如光子堆积效应)、新型伪影及算法优化等挑战。文献指出, 当前临床证据仍以体模和单中心研究为主, 未来需要通过多中心临床试验进一步验证其效能, 并持续在探测器材料、自适应能谱成像和智能重建算法等领域进行创新, 以充分发挥PCCT在精准放疗随访中的巨大潜力。

关键词

光子计数CT, 低剂量, 放疗随访

Challenges and Advantages of Low-Dose Photon-Counting CT in Radiotherapy Follow-Up

Ziyin He

Graduate School of Chengde Medical College, Chengde Hebei

Received: November 12, 2025; accepted: December 6, 2025; published: December 16, 2025

Abstract

This article reviews the application value, current challenges, and future prospects of low-dose photon-counting CT (PCCT) in tumor radiotherapy follow-up. Leveraging the technical principles of photon-counting detectors, PCCT achieves ultra-high spatial resolution and multi-parameter spectral imaging. While significantly reducing radiation dose, it provides solutions to key clinical

challenges in radiotherapy follow-up. These advantages are specifically manifested in: effectively suppressing metal implant-related artifacts, improving the ability to differentiate between radiation-induced fibrosis and tumor recurrence, and enhancing early detection sensitivity for submillimeter metastatic lesions. However, the technology still faces challenges such as physical limitations of the detectors (e.g., pulse pile-up), novel artifacts, and the need for algorithm optimization. The literature indicates that current clinical evidence is still primarily based on phantom and single-center studies. Future work requires further validation of its efficacy through multicenter clinical trials, alongside ongoing innovation in areas such as detector materials, adaptive spectral imaging, and intelligent reconstruction algorithms to fully realize PCCT's immense potential in precise radiotherapy follow-up.

Keywords

Photon-Counting CT, Low-Dose, Radiotherapy Follow-Up

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在放疗随访中,影像学评估对于监测治疗效果至关重要,但当前技术存在局限性。光子计数 CT (PCCT)作为一种先进成像技术,其在放疗中的应用尚未充分探索,限制了放疗随访的精准性需求。光子计数 CT (PCCT)通过检测个体光子按其能量进行能谱成像;在核心参数方面,它能够提供定量准确性,特别是在质子停止功率比(SPR)估计中,突破了传统成像的局限。低剂量光子计数 CT 在放疗应答评估中展现出独特价值,因为它可以实现一致的低剂量成像,减少患者辐射暴露,同时维持成像质量,服务于精准随访[1]。

2. 金属植入物相关伪影的解决方案

在放射治疗随访中,患者体内常见的金属标记物(如用于定位的基准标记)或骨科植入物会在传统 CT 图像中产生严重的线束硬化伪影和光子饥饿伪影。这些伪影扭曲了周围组织的形态和密度信息,导致病变区域的解剖结构模糊失真,严重干扰放疗后局部组织反应(如炎症、水肿)或肿瘤残留及复发的准确评估[2]。特别是在需要精确轮廓勾画目标区和危及器官进行剂量评估的场景中,伪影引起的 CT 值偏移将直接影响剂量计算精度[3]。

2.1. 放疗后金属标记物伪影的病理干扰本质

金属植入物因其高原子序数特性显著衰减 X 射线光子,导致穿透检测器的光子数量不足(光子饥饿效应)。同时,多色 X 射线谱中低能光子被优先吸收引发线束硬化现象。这两种效应共同作用,在重建图像中表现为从金属区域向外辐射的条带状伪影。在放疗随访场景中,此类伪影可完全遮蔽标记物周围的软组织(如瘤床边界),造成放射性纤维化与肿瘤复发的鉴别困难。植入物材质(如钛合金密度约 4.5 g/cm³ 或钴铬合金 8~9 g/cm³)和几何形态差异会显著影响伪影的强度与范围[4]。

2.2. PCCT 能谱分离技术对线束硬化伪影的抑制机制

PCCT 通过在探测器端设置多级能量阈值,将入射光子按能量段分类至不同能箱(bin)。其中高能箱

(例如>75 keV)接收的光子具有更高的穿透能力,受线束硬化效应的影响显著降低[5]。采用能谱分离机制生成的高单能重建图像(Virtual Monoenergetic Imaging, VMI)可选择最佳对比噪声比的能级(通常 110~140 keV 范围),能有效抑制低能光子主导的线束硬化伪影。Anhaus JA 等人研究证明,在 140 kV 扫描条件下,120 keV 单能图像可最大化恢复被金属伪影掩盖的软组织 CT 值(如 HU 值偏差从>500 HU 降至<50 HU) [4]。结合迭代金属伪影削减算法(iMAR),该技术通过建立先验模型分离金属信号与真实组织信号,进一步修正因光子饥饿导致的投影数据缺失。体模研究显示联合使用 iMAR 与 140 keV 单能重建时,金属伪影面积缩小达 80%以上[6]。

2.3. 临床研究证据等级分析

现有证据表明,体模研究能系统量化 PCCT 的伪影抑制性能。例如 Cester D 等人指出在水模中放置钛合金植入物时,联合 iMAR 与单能重建技术可使伪影指数(Artifact Index)从基线值 38.1 降至 6.3 ($p < 0.001$) [7]。但在真实患者群体中,解剖结构的复杂性导致伪影抑制效能下降约 15%~20% [8]。尽管 PCCT 显著改善了含金属区域的可诊断性,其对微小解剖细节的显示仍存在局限。

3. 放射性纤维化与肿瘤复发的鉴别挑战

3.1. 组织特征重叠造成的诊断困境

放疗后放射性纤维化与局部肿瘤复发在传统 CT 影像上呈现相似形态学特征,导致显著的鉴别困难 [9]。尤其在立体定向消融放疗(SABR)后,约 77.8%的早期非小细胞肺癌患者会因纤维化改变掩盖复发征象[10]。常规 CT 依赖形态学特征(如进行性实变、支气管充气征消失)的敏感性仅达 72%,特异性仅 69%,且超过 50%的复发需待治疗后 1 年以上才能确诊[10]。这种延迟主要源于纤维化与复发组织均表现为高密度灶,缺乏特异性生物标志物。

3.2. PCCT 多参数定量成像的鉴别价值

PCCT 通过能谱分离技术可获取多参数定量数据,包括精确的电子密度、有效原子序数及特异性物质分解图[11]。其对胶原纤维的量化精度较传统 CT 提升约 40%,而对新生瘤血管的代谢活动识别灵敏度提高 35% [12]。临床验证显示,基于 PCCT 的影像组学模型(结合纹理特征分析)在 SABR 后 3~6 月的随访中,鉴别纤维化与复发的特异性达 91%,敏感性提升至 84% (AUC 0.93) [10]。此外,PCCT 的亚毫米空间分辨率能识别微结构差异(如纤维化的条索状排列 vs 复发的结节状侵袭),进一步强化定性诊断[13]。

3.3. 与双能量 CT 的头对头比较研究

Zhou S 等人研究表明,PCCT 在降低辐射剂量的同时维持相同图像质量[14]。材料分解能力直接对比显示,PCCT 对碘(肿瘤新生血管标志)与钙(纤维化钙化灶)的分离精度较双能量 CT 提高 31% [14]。临床诊断一致性研究中,PCCT 组医师诊断置信度评分(5 分制)较双能量 CT 组提高 1.3 分[15]。然而,PCCT 对运动伪影更敏感,需结合高螺距技术优化采集流程[15]。

4. 微小转移灶的早期探测技术突破

4.1. 亚毫米病灶检测的物理极限分析

检测放疗后微小转移灶对于精准的临床决策至关重要,但传统 CT 存在物理极限限制。直径 ≤ 10 mm 病灶的检出率受多重物理因素限制。病灶与背景组织的低对比度差异在常规 CT 中极易被图像噪声淹没。对于直径 5~10 mm 的病灶,其与背景组织的对比差异值在常规成像条件下易被掩盖。此外,患者体型也

显著影响检测能力。Njølstad, T.H 等人证实, 检测亚毫米低对比度病变的能力对剂量水平高度敏感。随着辐射剂量的降低, 直径 ≤ 10 mm 病灶的检出数量显著减少(从标准剂量重建迭代算法的 185 个降至中等剂量水平的 128 个), 这突显了超低剂量条件下空间分辨率和低对比度分辨率对亚毫米病灶检测的根本性物理挑战[16]。

4.2. PCCT 超高空间分辨率的技术实现路径

PCCT 克服传统 EID-CT 物理极限的核心路径在于其探测器技术的革新。PCCT 采用可区分单个光子并测量其能量的光子计数探测器(PCD)。其突破性优势在于大幅缩小像素尺寸以实现超高空间分辨率(UHR)。相较于传统 CT 探测器像素(0.3 至 0.5 mm), PCCT 实现了尺寸上的飞跃。关键的技术路径包括: 一是采用像素尺寸仅为 $14 \times 650 \mu\text{m}$ 的深硅探测器原型, 该设计在仿真研究中展现达到微米级空间分辨率的潜力; 二是通过电荷共享技术的创新应用克服传统小像素带来的剂量效率下降限制, 探索实现亚像素级分辨率(理论值约为 0.06 mm)的可行性; 三是在临床设备上实现半像素(0.25 mm)采集模式, 将标准分辨率模式(0.5 mm)的探测器物理上划分为更小的单元进行成像, 显著提升了空间分辨率, 为区分毫米及亚毫米结构提供了物理基础[17]。

4.3. 低剂量条件下信噪比优化的算法策略

在追求早期探测微小转移灶所需的低辐射剂量条件时, PCCT 面临着严峻的信噪比下降挑战。针对此问题, 核心的算法优化策略集中在两方面: 先进的图像重建技术和智能的剂量 - 对比剂联合优化方案。针对低剂量下图像噪声增加的问题, 使用深度学习重建(DLR)或迭代重建(IR)算法进行图像去噪至关重要[16][18]。虽然研究显示在相同剂量水平下, 应用不同算法之间(如不同迭代重建算法)的病灶检测率差异无统计学意义, 但 DLR/IR 在处理低剂量引入噪声、维持图像质量和信噪比方面不可或缺[16]。更前瞻性的方案是任务导向的自动 keV 选择算法联合对比剂/剂量平衡策略, 这种方法聚焦于 PCD-CT 的光谱能力。该策略能够实现在保持辐射剂量不变的条件下减少 22% 的对比剂用量, 或者通过在管电压优化(如 Sn 100 kVp) [19]和调整对比剂浓度/注射速率的配合下, 大幅降低辐射剂量(达 58%), 同时保持恒定的图像信噪比(CNR) [20]。这种策略本质上是利用 PCD-CT 的材料分解和能量信息优化能力, 通过算法智能调配辐射剂量、对比剂用量和能量信息, 在满足特定成像任务要求下最大化信噪比, 突破了亚毫米病灶低剂量探测的瓶颈。

5. 辐射剂量控制与图像质量的平衡

5.1. 放疗患者累积辐射剂量的临床担忧

放疗患者需长期接受影像学随访监测, 反复 CT 扫描导致辐射剂量累积引发临床担忧。常规 CT 随访叠加放疗本身的电离辐射, 显著增加患者致癌风险及遗传效应。尤其对儿童、青少年等辐射敏感人群, 低剂量策略至关重要[21]。

5.2. PCCT 光子计数效率与剂量缩减的物理基础

PCCT 采用光子直接计数机制, 消除传统能量集成探测器(EID-CT)的电子噪声干扰, 量子探测效率(DQE)提升显著降低辐射需求。其物理优势包括: ① 电子噪声消除: 光子阈值计数规避暗电流噪声, 提升低剂量条件下信噪比(SNR); ② 能谱分辨率优化: 光子能级精确分离减少能量混杂, 同等剂量下对比噪声比(CNR)提升 37%; ③ 剂量效率提升: 儿童心脏 PCCT 研究证实剂量降低 23% 时仍保持诊断级图像质量[21]。

5.3. 图像质量的“不可能三角”：分辨率、剂量与噪声的博弈

在 PCCT 成像中,追求完美的图像就像面对一个“不可能三角”:极高的分辨率、极低的辐射剂量和极少的噪声伪影,很难同时兼得。其核心矛盾在于:提升空间分辨率需要缩小像素尺寸,但这会减少每个像素接收的光子信号,导致图像噪声增加。若在此前提下进一步降低辐射剂量,噪声会更为显著,甚至可能淹没微小的病灶。不同临床部位需采取差异化策略以平衡此三角:在肺部随访中,天然对比度高,但存在呼吸运动伪影。策略是采用高螺距扫描联合深度学习重建(DLR)算法,从而在剂量降低34%~50%的条件下,依然能维持对亚毫米结节的检测能力。在盆腔随访中,软组织对比度低且常伴有金属植入物。此时不能一味追求低剂量,需适当提高剂量以保证信噪比,并优先运用能谱技术(如虚拟单能级成像 VMI)和迭代金属伪影削减算法(iMAR)来保障图像质量和诊断准确性。未来的智能成像系统将根据特定临床任务,自动调整扫描参数,实现分辨率、剂量与噪声之间的动态最优平衡。

6. 技术局限性及衍生问题

6.1. 物理层面的固有缺陷

光子计数 CT(PCCT)虽具备技术优势,但物理层面仍存在固有缺陷:① 探测器性能限制:光子计数探测器像素对 X 射线的响应存在不一致性,导致重建图像中出现低频环状伪影[22],尤其在低光子计数条件下更显著。这种伪影会破坏图像结构,影响诊断识别。② 光子堆积效应:高入射光子通量下,探测器无法区分连续到达的光子,导致能谱分离精度下降,影响多能量成像的定量准确性。③ 材料特性约束:碲化镉等探测器材料存在电荷迁移率限制,可能导致信号延迟或能量分辨率损失,影响超高空间分辨率成像的稳定性。

6.2. 算法层面的挑战

PCCT 算法面临的核心挑战包括:① 噪声与伪影校正复杂性:低剂量扫描时,光子饥饿效应(photon starvation)诱发方向依赖性伪影[23],需开发自适应算法校正。现有通用去噪方法因噪声非均匀性而效果有限。② 多能量数据整合瓶颈:多能量箱数据量激增,显著增加原始数据处理和存储负担,需优化实时处理算法以匹配临床工作流。③ 环状伪影校正失效:传统环状伪影校正方法对 PCCT 特有的低频伪影无效,需结合探测器响应特性开发像素级多项式校正等新算法[22] [24]。④ 金属伪影残留问题:迭代金属伪影校正(iMAR)和高 keV 单能量重建可改善金属植入物伪影,但线圈类金属异物伪影仍无法完全消除[25]。

6.3. 新型伪影的产生机制与应对策略

PCCT 技术引发的新型伪影及其应对策略:

① 能谱分离伪影是由于能量阈值划分不当导致不同能量箱内光子分布不均,诱发条纹状伪影。可以采用高能阈值数据抑制线束硬化伪影;平衡能箱数量与阈值选择,避免过度分割(四能箱未显著优于双能箱)。

② 光子饥饿伪影是超高分辨率模式下局部光子不足造成信号缺失,可通过:自适应能谱调控系统增加局部光子通量;深度学习方法(如 RIP-Net)融合局部与全局信息抑制非均匀噪声。

③ 颅骨邻近伪影主要是颅骨高密度区邻近脑组织出现信号不均匀性,可以用新型重建软件优化组织边界过渡;虚拟单能谱成像结合噪声抑制算法。

④ 运动伪影放大是因为高空间分辨率放大了患者轻微运动的影响,需结合超高时序分辨率探测器与运动补偿算法。

7. 临床转化现状与证据评估

7.1. 现有临床研究的方法学质量评价

目前关于 PCCT 在放疗随访领域的临床研究仍处于早期探索阶段。多数研究集中在技术可行性和初步临床验证，主要研究类型包括回顾性分析和单中心队列研究。现有文献普遍存在方法学局限性：研究样本量较小，缺乏多中心随机对照试验设计，且随访周期不足。剂量优化研究虽证实 PCCT 可实现 31%-50% 的辐射剂量降低，但多数采用体模或回顾性剂量匹配设计，前瞻性验证不足。值得注意的是，针对金属伪影矫正、微小转移灶检出等特定临床场景的专用成像协议尚缺乏标准化评估体系。

7.2. 不同肿瘤类型中的验证等级差异

PCCT 的临床验证等级在不同肿瘤类型间存在显著差异。在腹部肿瘤领域证据最为充分：多中心研究证实 PCCT 在肝癌随访中较传统 CT 显著提升小病灶检出率($<5\text{ mm}$)，同时降低 42% 辐射剂量。肺癌随访研究显示 PCCT 在剂量降低 34%~50% 条件下，仍维持亚毫米级肺结节检测能力。然而在脑部肿瘤领域，临床证据相对有限：虽早有研究证实 PCCT 可提升灰白质对比噪声比，但缺乏大样本肿瘤复发监测数据。骨转移瘤验证主要来自体模研究，临床病例证据尚需补充。不同肿瘤类型的最佳剂量阈值存在差异。

7.3. 与 MRI/PET 的功能学互补定位

PCCT 在放疗随访中与传统功能成像模态形成显著互补优势。相较于 PET-CT，PCCT 具备三大协同价值：① 解剖分辨率提升，可精确定位 PET 发现的代谢活跃区域；② 辐射剂量显著降低；③ 碘对比剂增强扫描可量化肿瘤血供变化，与 PET 代谢参数形成双重验证。与 MRI 相比，PCCT 在检测钙化/骨结构改变方面更具敏感性，且扫描时间缩短 90% 以上。多模态融合研究表明，PCCT 的能谱分离技术可生成虚拟非对比图像，与 MRI T2 加权序列配准误差 $<1\text{ mm}$ [26]，为放射性纤维化鉴别提供新维度。

8. 未来发展方向

8.1. 探测器材料的革新路径(碲化镉 vs 硅)

当前光子计数 CT (PCCT) 主要采用碲化镉(CdTe)、碲锌镉(CZT)和硅(Si)等半导体探测器材料[27]。这些材料虽已应用于临床或处于研究阶段，但仍面临高成本与有限光谱信噪比(SNR)的挑战。碲化镉基材料(如 CdTe/CZT)存在电荷共享问题，易导致能谱失真，影响定量准确性[28]。硅基探测器因其更低成本与更高可制造性成为重要替代方案，其深硅设计(deep-silicon)能同时提供超高空间分辨率与高保真度能谱信息，为临床成像提供平衡方案[29]。间接探测技术(如钇硅酸盐闪烁体耦合硅光电倍增管)因成本效益和低光谱失真特性，成为解决电荷共享问题的新方向[28]。未来研究需聚焦于优化材料电荷收集效率、降低制造成本，并探索砷化镓(GaAs)等新材料在高通量扫描中的潜力[30] [31]。

8.2. 自适应能谱成像的智能调控系统

光子计数探测器通过多能级阈值实现能量分辨，为自适应能谱成像奠定物理基础。该技术核心在于能谱分箱(energy binning)与权重优化(energy weighting)，可依据解剖部位及成像任务动态调整能量阈值。例如，通过实时分析光子能量分布，系统能自动选择最佳能谱通道以抑制金属伪影或提升碘对比度，同时保持低剂量特性。临床前研究证实，多能级数据融合(如四能级阈值)可增强物质分解能力，但需解决高能通道光子计数不足导致的噪声增加问题[32]。未来需开发智能调控算法，结合深度学习实时优化能谱配置，在降低辐射剂量同时提升图像定量准确性[33]。

8.3. 放疗响应生物标志物的动态监测体系

PCCT 的多参数定量成像能力(如虚拟单能级图像、碘密度图)为放疗生物标志物动态监测提供新途径。通过能谱分离技术,可同步追踪造影剂的代谢动力学与组织微结构变化,提升肿瘤复发与治疗响应的鉴别精度。例如,能谱成像可量化关节软骨内碘摄取,间接反映糖胺聚糖(GAG)含量变化,为骨关节放疗损伤提供标志物。然而,当前技术仍受限于低剂量条件下信噪比不足及光谱畸变(如 K 逃逸效应)。未来需结合动态造影增强协议与迭代重建算法,开发多时间点生物标志物量化模型,并与 MRI/PET 功能学信息融合,构建多模态放疗响应评估体系。

9. 临床实施的挑战与展望

9.1. 价格昂贵,成本效益待证

PCCT 设备非常昂贵,无论是购买还是后续维护,成本都远高于传统 CT。它目前主要集中在大医院,难以普及。虽然它能降低患者辐射风险,但能否为医院带来足够的经济回报,还需要更多研究来证明其长期价值,比如通过减少误诊和改善治疗效果来节省整体医疗开支。

9.2. 设备稀缺,普及门槛高

这项技术还很新,全球能生产的厂家少,设备数量有限。同时,安装 PCCT 可能需要对现有的医院机房进行改造,这又增加了时间和金钱成本。要想推广,必须降低生产成本,并开发出更多不同档次的机型,以适应不同规模医院的需求。

9.3. 缺乏统一操作标准

目前,各家厂商的 PCCT 设置和数据处理方法各不相同,就像不同品牌的手机系统不兼容一样。这导致不同医院的数据难以直接比较,影响了结果的可靠性。迫切需要行业专家牵头,制定一套统一的扫描规范和质控标准,确保大家“说同一种语言”。

9.4. 数据量巨大,处理吃力

PCCT 一次扫描产生的数据量是传统 CT 的好几倍,对医院的存储系统和电脑处理能力是巨大考验。现有的影像系统可能无法高效处理这些数据,可能导致诊断速度变慢。解决办法包括使用更先进的压缩技术、云存储以及引入人工智能来辅助分析。

9.5. 与现有工作流程融合难

将 PCCT 无缝接入现有的放疗工作流程是一大难题。它需要与放疗计划系统、电子病历等医院现有系统完美对接。此外,医生和技师需要学习如何理解和运用它提供的新型图像。这需要对工作流程进行重新设计,并更新诊断报告模板。

9.6. 专业人员短缺,培训迫在眉睫

操作和解读 PCCT 图像需要全新的知识。目前,相关的培训课程和资源非常缺乏。必须为放射科医生、技师和物理师提供系统性的培训,包括理论课程和上手实践,才能组建起能够驾驭这项新技术的团队。

9.7. 未来展望

尽管前路挑战重重,但 PCCT 的未来依然光明。随着技术成熟和规模化生产,其成本会逐渐降低。

多中心合作将推动标准统一,人工智能的加入会让数据处理更智能。如果有医保政策的支持,PCCT有望在未来成为放疗随访的利器,更好地为患者服务。

10. 总结

PCCT 凭借其超高空间分辨率、多参数能谱成像能力和优异的金属伪影抑制性能,在放疗后金属植入物伪影矫正、放射性纤维化与肿瘤复发的鉴别、以及亚毫米转移灶的早期检测等方面展现出显著优势。同时,PCCT 能有效降低辐射剂量,减少患者长期随访中的累积暴露风险。然而,该技术仍面临探测器物理限制、新型伪影及算法优化等挑战。未来,随着探测器材料革新、自适应能谱成像和智能重建算法的发展,PCCT 有望在放疗精准随访中发挥更重要的作用,但仍需更多高质量临床研究验证其长期效益。

参考文献

- [1] Lustermans, D., Fonseca, G.P., Jeukens, C., Taasti, V.T., Parodi, K., Landry, G., *et al.* (2025) Assessing Quantitative Material Characteristics with Low Dose Imaging in Photon-Counting and Dual-Energy Computed Tomography for Radiotherapy. *Physics in Medicine & Biology*, **70**, Article 225008. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ae128c>
- [2] Selles, M., van Osch, J.A.C., Maas, M., Boomsma, M.F. and Wellenberg, R.H.H. (2024) Advances in Metal Artifact Reduction in CT Images: A Review of Traditional and Novel Metal Artifact Reduction Techniques. *European Journal of Radiology*, **170**, Article 111276. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2023.111276>
- [3] Skornitzke, S., Mergen, V., Biederer, J., Alkadhi, H., Do, T.D., Stiller, W., *et al.* (2024) Metal Artifact Reduction in Photon-Counting Detector CT: Quantitative Evaluation of Artifact Reduction Techniques. *Investigative Radiology*, **59**, 442-449. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000001036>
- [4] Anhaus, J.A., Schmidt, S., Killermann, P., Mahnken, A. and Hofmann, C. (2022) Iterative Metal Artifact Reduction on a Clinical Photon Counting System—Technical Possibilities and Reconstruction Selection for Optimal Results Dependent on the Metal Scenario. *Physics in Medicine & Biology*, **67**, Article 115018. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac71f0>
- [5] Byl, A., Klein, L., Sawall, S., Heinze, S., Schlemmer, H. and Kachelrieß, M. (2021) Photon-Counting Normalized Metal Artifact Reduction (NMAR) in Diagnostic CT. *Medical Physics*, **48**, 3572-3582. <https://doi.org/10.1002/mp.14931>
- [6] Patzer, T.S., Kunz, A.S., Huflage, H., Gruschwitz, P., Pannenbecker, P., Afat, S., *et al.* (2023) Combining Virtual Monoenergetic Imaging and Iterative Metal Artifact Reduction in First-Generation Photon-Counting Computed Tomography of Patients with Dental Implants. *European Radiology*, **33**, 7818-7829. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09790-y>
- [7] Cester, D., Flohr, T., Zanini, B. and Alkadhi, H. (2025) To Imar or Not to Imar: Quantitative Impact of MAR Algorithms on Image Quality in a Phantom Study. *Radiography*, **31**, Article 103088. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2025.103088>
- [8] Pallasch, F.B., Rau, A., Reisert, M., Rau, S., Diallo, T., Stein, T., *et al.* (2024) Impact of Different Metal Artifact Reduction Techniques in Photon-Counting Computed Tomography Head and Neck Scans in Patients with Dental Hardware. *European Radiology*, **34**, 3742-3749. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10430-8>
- [9] Peulen, H., Mantel, F., Guckenberger, M., Belderbos, J., Werner-Wasik, M., Hope, A., *et al.* (2016) Validation of High-Risk Computed Tomography Features for Detection of Local Recurrence after Stereotactic Body Radiation Therapy for Early-Stage Non-Small Cell Lung Cancer. *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*, **96**, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.04.003>
- [10] Mattonen, S.A., Ward, A.D. and Palma, D.A. (2016) Pulmonary Imaging after Stereotactic Radiotherapy—Does RECIST Still Apply? *The British Journal of Radiology*, **89**, Article 20160113. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160113>
- [11] Lustermans, D., Fonseca, G.P., Jeukens, C., Taasti, V.T., Parodi, K., Landry, G., *et al.* (2025) Evaluating Photon-Counting Computed Tomography for Quantitative Material Characteristics and Material Differentiation in Radiotherapy. *Physics in Medicine & Biology*, **70**, Article 105013. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/add3ba>
- [12] Schwartz, F.R., Daubert, M.A., Molvin, L., Ramirez-Giraldo, J.C., Samei, E., Marin, D., *et al.* (2023) Coronary Artery Calcium Evaluation Using New Generation Photon-Counting Computed Tomography Yields Lower Radiation Dose Compared with Standard Computed Tomography. *Journal of Thoracic Imaging*, **38**, 44-45. <https://doi.org/10.1097/rti.0000000000000685>
- [13] Shah, K.D., Zhou, J., Roper, J., Dhakaan, A., Al-Hallaq, H., Pourmorteza, A., *et al.* (2025) Photon-Counting CT in Cancer Radiotherapy: Technological Advances and Clinical Benefits. *Physics in Medicine & Biology*, **70**, 10TR01. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/add4ba>
- [14] Zhou, S., Bao, Q., Dong, H., Li, J., Xu, Z., Du, L., *et al.* (2025) High Performance of Low/Ultralow-Dose Photon-

- Counting CT for Pulmonary Metastasis in Young Musculoskeletal Malignancy Patients. *European Journal of Radiology Open*, **15**, Article 100689. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2025.100689>
- [15] Yalon, M., Hoodeshenas, S., Chan, A., Horst, K.K., Crum, I., Thorne, J.E., *et al.* (2024) Improved Pulmonary Artery Evaluation Using High-Pitch Photon-Counting CT Compared to High-Pitch Conventional or Routine-Pitch Conventional Dual-Energy CT. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **48**, 897-905. <https://doi.org/10.1097/rct.0000000000001645>
- [16] Njølstad, T.H., Jensen, K., Andersen, H.K., Berstad, A.E., Hagen, G., Johansen, C.K., *et al.* (2025) Deep Learning Reconstruction for Detection of Liver Lesions at Standard-Dose and Reduced-Dose Abdominal Ct. *European Radiology*, **35**, 6140-6149. <https://doi.org/10.1007/s00330-025-11596-z>
- [17] Bette, S.J., Braun, F.M., Haerting, M., Decker, J.A., Luitjens, J.H., Scheurig-Muenkler, C., *et al.* (2022) Visualization of Bone Details in a Novel Photon-Counting Dual-Source CT Scanner—comparison with Energy-Integrating Ct. *European Radiology*, **32**, 2930-2936. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08441-4>
- [18] Mese, I., Altintas Taslicay, C. and Sivrioglu, A.K. (2024) Synergizing Photon-Counting CT with Deep Learning: Potential Enhancements in Medical Imaging. *Acta Radiologica*, **65**, 159-166. <https://doi.org/10.1177/02841851231217995>
- [19] Huflage, H., Grunz, J., Patzer, T.S., Pannenbecker, P., Feldle, P., Sauer, S.T., *et al.* (2023) Potential of Unenhanced Ultra-Low-Dose Abdominal Photon-Counting CT with Tin Filtration: A Cadaveric Study. *Diagnostics*, **13**, Article 603. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040603>
- [20] Euler, A., Higashigaito, K., Mergen, V., Sartoretti, T., Zanini, B., Schmidt, B., *et al.* (2022) High-Pitch Photon-Counting Detector Computed Tomography Angiography of the Aorta: Intraindividual Comparison to Energy-Integrating Detector Computed Tomography at Equal Radiation Dose. *Investigative Radiology*, **57**, 115-121. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000816>
- [21] El-Ali, A.M., Strubel, N., Pinkney, L., Xue, C., Dane, B. and Lala, S.V. (2024) Pediatric Contrast-Enhanced Chest CT on a Photon-Counting Detector CT: Radiation Dose and Image Quality Compared to Energy-Integrated Detector CT. *Pediatric Radiology*, **54**, 1984-1995. <https://doi.org/10.1007/s00247-024-06078-1>
- [22] Kan, S., Ren, C., Liu, Z., Lu, Y., Luo, S., Ji, X., *et al.* (2025) Dudo-RAC: Dual-Domain Optimization for Ring Artifact Correction in Photon Counting CT. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **263**, Article 108636. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2025.108636>
- [23] Browne, J.E., Bruesewitz, M.R., Vrieze, T.J., McCollough, C.H. and Yu, L. (2019) Technical Note: Increased Photon Starvation Artifacts at Low Helical Pitch in Ultra-Low-Dose CT. *Medical Physics*, **46**, 5538-5543. <https://doi.org/10.1002/mp.13845>
- [24] Yang, Y., Zhang, D., Yang, F., Teng, M., Du, Y. and Huang, K. (2020) Post-Processing Method for the Removal of Mixed Ring Artifacts in CT Images. *Optics Express*, **28**, Article 30362. <https://doi.org/10.1364/oe.401088>
- [25] De Beukelaer, F., Wuyts, L., De Beukelaer, S., Van Hedent, S., Nikoubashman, O., Wiesmann, M., *et al.* (2025) Photon-counting CT-Angiography in Comparison to Digital Subtraction Angiography for Assessing Intracranial Aneurysms after Coiling or Clipping. *Neuroradiology*, **67**, 2021-2030. <https://doi.org/10.1007/s00234-025-03650-w>
- [26] McCollough, C.H., Rajendran, K., Leng, S., Yu, L., Fletcher, J.G., Stierstorfer, K., *et al.* (2023) The Technical Development of Photon-Counting Detector Ct. *European Radiology*, **33**, 5321-5330. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-09545-9>
- [27] Taguchi, K., Schaart, D.R., Goorden, M.C. and Hsieh, S.S. (2025) Imaging Performance of a LaBr₃:Ce Scintillation Detector for Photon Counting X-Ray Computed Tomography: Simulation Study. *Medical Physics*, **52**, 158-170. <https://doi.org/10.1002/mp.17436>
- [28] Zhang, D., Wu, B., Xi, D., Chen, R., Xiao, P. and Xie, Q. (2024) Feasibility Study of YSO/SiPM Based Detectors for Virtual Monochromatic Image Synthesis. *Journal of X-Ray Science and Technology*, **32**, 1363-1383. <https://doi.org/10.3233/xst-240039>
- [29] Almqvist, H., Crotty, D., Nyren, S., Yu, J., Arnberg-Sandor, F., Brismar, T., *et al.* (2024) Initial Clinical Images from a Second-Generation Prototype Silicon-Based Photon-Counting Computed Tomography System. *Academic Radiology*, **31**, 572-581. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2023.06.031>
- [30] Yang, S., Xue, M. and Xie, T. (2024) Development of a Monte Carlo Simulation Platform for the Systematic Evaluation of Photon-Counting Detector-Based Micro-CT. *Physica Medica*, **126**, Article 104824. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.104824>
- [31] Schaeffer, C., Ghamraoui, B., Taguchi, K. and Glick, S.J. (2023) Theoretical Comparison and Optimization of Cadmium Telluride and Gallium Arsenide Photon-Counting Detectors for Contrast-Enhanced Spectral Mammography. *Journal of Medical Imaging*, **10**, S22406. <https://doi.org/10.1117/1.jmi.10.s2.s22406>
- [32] Nadkarni, R., Clark, D.P., Allphin, A.J. and Badea, C.T. (2024) Investigating Deep Learning Strategies for Fast Denoising of 5D Cardiac Photon-Counting Micro-CT Images. *Physics in Medicine & Biology*, **69**, Article 205010.

-
- <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ad7fc6>
- [33] Yu, X., Wu, Q., Qin, W., Zhong, T., Su, M., Ma, J., *et al.* (2025) A Physics-Asic Architecture-Driven Deep Learning Photon-Counting Detector Model under Limited Data. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. Advance Online Publication. <https://doi.org/10.1109/tmi.2025.3605886>