

# 数字化体层摄影在骨关节系统中的应用

侯文娜 何生 姜增誉 郑玄中 邓国祥

**【摘要】** X线摄影是在二维图像上显示三维结构,组织的结构和密度在影像上重叠,给诊断增加了一定的难度。数字化体层摄影是一种新的断层摄影技术,是以传统体层摄影的几何原理为基础,结合现代数字电子技术尤其是计算机图像处理技术研发的新型体层成像方法。本篇综述将对数字化体层摄影发展及原理做简单介绍,旨在探讨其在骨关节系统中的应用,为临床医生在骨关节疾病诊断中进一步提供新思路。

**【关键词】** 放射摄影术; 骨折; 关节炎

**The application of digital tomosynthesis in the system of skeletal and joint** Hou Wenna\*, He Sheng, Jiang Zengyu, Zheng Xuanzhong, Deng Guoxiang. \*The Medical Imaging of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

Corresponding author: Deng Guoxiang, Email: denggx126@126.com

**【Abstract】** X-ray photography uses its penetration to display the three-dimensional structures in the two-dimensional films, which leads to easily making the overlap of structures and density in images, so that it is difficult to diagnose. Digital tomosynthesis is a new tomography method, which is based on the geometric principles of conventional tomography and combines with modern digital electronic technology, especially computer image processing technology. This review briefly describes the development and principle of digital tomosynthesis, and then discusses its application in skeletal and joint systems, furthers studying of which will contribute to providing new ideas for clinicians' diagnosis.

**【Key words】** Radiography; Fractures, bone; Arthritis

数字化体层摄影(digital tomosynthesis, DTS)又称断层融合成像、体层合成摄影或容积成像等,是近年来出现的一种影像新技术,是X线球管在一系列低剂量曝光之后,并在其曝光的轨迹内,多个角度的获取扫描物体的投影数据,然后通过计算机重建出任意深度层面的图像<sup>[1]</sup>。

## 一、DTS 发展史

20世纪初,人们就发现了DTS。最早在1933年Ziedes就从理论上验证了通过多个角度投影数据可以重建出平行于探测器平面的任意深度层面图像。1962年Garrison等开始使用比较原始的设备实践的理论。1972年Grant发明了一种通过旋转成像重建出任意深度层面图像的新方法,并发明了“tomosynthesis”一词<sup>[2]</sup>。受到当时条件的限制以及后来CT的普遍使用,使DTS的研究一度被打断。近些年伴随着高效能的数字平板探测器的问世、计

算机运算速度的提高、甚至模糊算法的不断发展,确保了DTS可以在较短时间内获得较高层间分辨率的断层图像,从而又重新激发了研究人员对DTS成像的兴趣,特别是在重建法、降噪方法以及工业和临床应用方面的研究。

## 二、DTS 原理

DTS图像重建算法可分为位移-叠加算法,以及迭代算法、滤波反投影算法等。此外,合成图像的质量主要受投影重建方法和图像质量的影响<sup>[3]</sup>。对于前者,关键是采用何种方法来去除层外结构的模糊噪声,滤波反投影、迭代去噪法、矩阵反转法、空间频率滤波、选择性层面移除等都是DTS一般的去噪算法,需要指出的是对于不同结构部位应该选择不一样降噪方法,没有哪一种方法能任意地应用于所有的情况。对于后者可以通过提高探测器的性能来改善<sup>[4-5]</sup>。

## 三、DTS 在骨与关节疾病中的应用

### (一) 骨骼先天发育异常

骨先天发育异常一般可以通过X线平片诊断,然而茎突综合征、内听道畸形、颌骨发育异常、寰

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-0785.2014.04.038

基金项目:山西医科大学第一医院院级科研基金(YJ1201)

作者单位:030001 太原,山西医科大学医学影像学系(侯文娜);

山西医科大学第一医院放射科(何生、姜增誉、郑玄中、邓国祥)

通讯作者:邓国祥, Email: denggx126@126.com

枕并寰枢融合畸形等往往由于结构的复杂和(或)重叠很难通过普通平片诊断,但是DTS可以克服这些因素的影响,能较好地显示骨骼先天发育畸形。

以茎突综合征为例阐述DTS在骨骼先天性发育异常中的应用。茎突综合征是因为茎突发育异常引起不明原因咽部异物感或咽部疼痛等为主要临床症状的疾病<sup>[6-7]</sup>。DTS克服了常规X线片投照茎突时影像重叠造成的影响,能够清晰地将双侧茎突的体层影像结构投射在一张胶片上,投照方法简单易行,患者体位容易配合,经济方便,患者所受照射剂量少。此外,充分暴露视野,无重叠,能够快捷方便地测量出茎突的长度及其夹角,使得更直观更形象化地满足临床对茎突综合征的诊断要求<sup>[8]</sup>。

## (二) 隐匿性骨折和骨折内、外固定术后随访

隐匿性骨折是指用常规X线检查难以发现或者难以及时发现的骨折,往往发生在深在部位或者结构复杂部位的骨折,患者通常有明显的外伤史和典型的临床体征,但实际上有骨皮质和(或)骨小梁的连续性中断,但是由于骨折端没有相互错位,而导致平片检查假阴性的情况<sup>[9]</sup>。DTS可对平片难以确定隐匿性骨折、骨折愈合和骨痂生长情况做出客观、准确的评价。

DTS检查在不同部位骨折中的应用如下。

1. 齿状突骨折: DTS可以用于不易投照成功且易重叠的结构投照。齿状突平片投照需要张口位,患者多由于颅脑损伤,意识不清,或者疼痛很难配合,导致投照失败;此外,即使齿状突投照成功,由于它所处位置深且周围组织结构复杂易重叠,往往导致轻微裂纹骨折不会清晰显示。DTS可以克服这些问题,能够重建出任意体层的图像,对于齿状突细小的骨折有其独到的方面。研究表明: DTS对骨折的检出率和CT的检出率是相同的<sup>[10]</sup>,普通CT平扫只能在轴位上看见骨折线,而不能直观地显示骨折线在齿状突的具体位置情况,必须通过后处理重建技术才能获得直观的图像,但是这花费一定的时间,更甚者CT的辐射剂量也明显高于DTS,但是不可否认CT重建所提供的信息远远比DTS多,因此需要临床医师正确地权衡CT与DTS的利弊,准确获取满足临床诊断的依据。

2. 脊柱骨折: DTS不易被周围物体干扰,降低了一定的误诊率和漏诊率。当患者有骨质疏松时,对于胸腰椎椎体和椎弓附件的轻微骨折和不完全骨折,平片不易显示,DTS却可以清晰地显示有骨

皮质和骨松质的连续性中断;当平片仅显示椎体楔形变、压缩骨折处显示界限不清晰,DTS却能够清晰显示椎体边缘的局部骨皮质呈尖角样翘起中断以及压缩骨折椎体中部相互嵌插形成的横行高密度线影<sup>[11]</sup>。而对于骶尾骨来说,由于周围肌肉发达,所处位置比较深以及肠道粪块和气体的影响,即便采用高千伏摄影条件也很难获得较好的正位X线图像,甚至有时容易产生伪影而误认为是骨折线,为临床医师提供错误的信息,大量临床试验已经证明:DTS能明显降低重复检查率和骶尾骨骨折及脱位的漏诊率<sup>[12]</sup>。

3. 舟状骨骨折: DTS能显示单纯的骨小梁的骨折。X线已经不足以检测所有的舟状骨骨折,据报道隐匿性的舟状骨骨折发生率在9%~33%<sup>[13]</sup>。舟状骨DTS成像主要包括增加图像噪声和邻近皮质线条和腕关节结构的叠加。DTS和CT都能显示单纯的骨小梁的骨折,我们可以质疑的是DTS诊断的单纯骨小梁骨折与骨皮质骨折治疗是否可以不同。此外,DTS只能重建平行于检测器的平面,因此要得到CT多平面重建图像是根本不可能的<sup>[14]</sup>。

4. 胫骨髁间嵴骨折: DTS可以克服关节间隙窄和弯曲度所导致的重叠。由于膝关节间隙窄,宽度约1cm左右,且髁间嵴位置较深,普通平片投射略有偏差,髁间嵴就很容易被周围组织掩盖,将不易显示骨折线<sup>[15-16]</sup>。DTS可以弥补平片检查的缺点,获得关节内的断面图像,胫骨髁间嵴细小的骨折线和小的撕脱骨折块可以被清晰地显示,很大程度上地加大了髁间嵴骨折的检出率和确诊率。然而与CT相比,DTS对骨折的诊断率与CT相当,但是患者所接受的剂量低,而且从放射科更换到CT室,不仅延误诊断时间,而且可能对患者造成再次的伤害<sup>[12,17]</sup>。

此外DTS对鼻骨、股骨颈、足跗骨、肋骨、下颌骨、腕关节、肘关节等的隐性骨折也有很大诊断价值及临床应用。

综上所述,DTS诊断隐匿性骨折具有以下几点优势:(1)能够有效地克服周围组织的干扰,同时能够有效提高图像的清晰度,大大提高了患者隐匿性骨折的检出率;(2)后处理功能强大,操作快捷简单,检查时间短,能快速获得有效图像,对急诊隐匿性骨折患者的诊断有其独特的优势;(3)DTS在透视下定位,不需要更换科室,减少了患者因搬动而引起的痛苦及再一次的伤害;(4)对于X

线检查不理想或者无法进行确诊的情况, DTS 能够提高诊断图像的质量, 使诊断更加准确; (5) 辐射剂量低, 检查费用低, 空间分辨率高。

DTS 对隐匿性骨折诊断的不足: (1) DTS 只能得到矢状位和冠状位, 大部分的 DTS 不能得到轴位图像。(2) DTS 的图像密度分辨率不如 CT, 不能测量病变部位的平均密度值。

此外, DTS 对于复查骨折内、外固定术后情况也有非常重要的作用。用钢板、髓内钉等内固定时, 无论正位还是侧位, 内固定金属影往往重叠在骨骼上, 干扰了骨折断端的显示<sup>[18-19]</sup>。石膏等外固定物往往都比较厚, X 线穿透比较困难, 因此普通平片只能粗略地投射出骨折断端情况, 但不能清晰地投射出断端的愈合情况及有骨痂形成与否。因此, DTS 受内、外固定物的影响较小, 可以通过清晰地显示骨折断端的生长情况及骨痂生成的情况, 为临床骨科医师做出客观详尽的评价。

### (三) 人工关节置换术后影像评估

对于人工关节置换, 人工假体松动是一种比较常见的术后并发症, DTS 相比平片能更清晰地显示脱矿和骨质溶解的程度, 观察假体与骨之间隙的变化, 能更好地对人工关节置换术进行评估。而与 CT 相比 DTS 受假体影响小, 无金属伪影的干扰, 是评价关节置换术后假肢松动的可靠方法<sup>[20]</sup>。但是, 不足之处就是 DTS 缺乏对其轴位的评估。

### (四) 关节炎性疾病

常见的关节炎疾病主要有类风湿性关节炎、骨关节炎、牛皮癣性关节炎和痛风性关节炎等。其中最易引起骨质破坏的是类风湿性关节炎, 因此尽早寻找提示骨质侵蚀的影像征象对于类风湿性关节炎的诊断、评估、治疗意义非凡。

DTS 可以测量三维关节间隙宽度、骨侵蚀体积等, 这些都与类风湿性关节炎的发展密切相关。一方面, 由于一些手指关节面复杂的弯曲度, 使得普通平片上不能间接地表现出软骨的损伤; 另一方面, 由于结构的重叠, 使特殊的骨侵蚀在普通 X 线片上无法被看见; 此外, 骨的侵蚀一般发生在骨顶端, 在这个地方有很多的骨小梁结构, 当骨侵蚀比较小的时候, 区分骨侵蚀与普通的骨小梁可能特别困难<sup>[21]</sup>。Duryea 等<sup>[22]</sup>在最优控制断层融合重建参数的研究表明: 矩阵反转法可以减少在用位移-叠加算法体层摄影的图像平面以外的伪影。在调查的文献中应用计算机处理手关节炎的影像变得越来越

流行, 并且在膝关节炎病例中, 被用作临床研究结果测量的替代方法<sup>[21]</sup>。但是, 类风湿性关节炎导致的肌腱和滑膜等的病变, DTS 不能做出直接诊断, 不能全面、准确地评估其临床状态。

其他影像学检查方法对类风湿性关节炎的诊断价值: 普通 X 线对于两年以内病程的患者诊断意义是相当有限的, 对于发现骨质侵蚀的敏感性也十分低<sup>[23]</sup>; 超声显示骨质侵蚀的能力差, 探头与皮肤接触的面积大, 对操作者来说显示小关节病变的难度很高, 此外超声由于手骨所产生的声影常使掌骨及第 3、4、5 桡侧的掌指关节面显示不清晰<sup>[24]</sup>; CT 对于类风湿性关节炎的诊断显示了一定的潜力, 但是辐射剂量大, 长期随访对患者损害是不可估量的; MR 可显示关节腔积液、骨髓内的水肿、关节软骨的破坏、滑膜增生及血管翳形成、肌腱和韧带的增厚等, 其中在影像学上获得了重大的突破的就是血管翳的显示<sup>[25]</sup>, 与普通 X 线平片、DTS、超声、CT 相比, 其对于早期腕关节骨质侵蚀及滑膜病变的显现更为敏感, 但其检查费用昂贵, 长期随访观察比较困难, 同时在急性炎症期由于部分容积效应和关节表面的肿胀, 对于小关节细微侵蚀但是已表现出典型临床症状的患者, 也很难在 MRI 投射出来<sup>[26]</sup>。

### (五) 以骨骼为地标在放疗摆位校正中的应用

研究表明<sup>[1]</sup>, 基于 FDK 改进算法重建出的 DTS 图像, 当投影数据为 40°左右时, 图像能够清晰地显示软组织和骨骼结构。当骨骼解剖(脊柱等)<sup>[27]</sup>结构被用作前列腺癌、头颈部癌症图像引导放射治疗的地标时, DTS 和 CBCT 可提供相同质量的图像, 然而 DTS 的重建时间约为 CBCT 重建时间的 1/9, 并且患者接受较低的额外照射剂量( $<1 \text{ cGy}$ )<sup>[28-29]</sup>。因此, DTS 完全展示其适合作为日常的 3D 定位的潜在工具, 可以以骨骼为地标进行放疗摆位校正。下一步的工作就是继续完善 DTS 加速重建, 实现加权和反投影的加速计算。

### 四、问题与展望

DTS 经济、简便有效、辐射剂量低, 作为 X 线检查的一种延伸和补充手段, 具有很好的使用价值。随着新技术的不断发展, DTS 除了在骨关节系统影像诊断方面有其独特的优势外, 在肺、肾结石以及胆管和肠道系统等方面检查诊断价值也很被看好, 甚至在食管造影中, 在同一画面上我们可以清晰地观察到从咽喉流入胃的全过程, 或者直观地获得输尿管造影的全景蠕动图像, 进而清楚地显示

功能性病变, 帮助临床医师作出准确的诊断<sup>[30-32]</sup>。

当然, DTS 技术也在不断改进中, 今后的改进方向主要有以下方面: (1) 改进图像显示方法; (2) 优化成像参数及改进重建算法; (3) 通过大量临床试验, 准确地计算和评估其临床应用灵敏度和特异度<sup>[12]</sup>。随着 DTS 技术的不断发展, DTS 图像质量也将会更加完善。DTS 的临床应用前景将更加广阔。

### 参 考 文 献

- [1] 冯亚崇, 周凌宏, 甄鑫, 等. 基于 FDK 算法的数字合成 X 线体层成像[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 28(2): 2505-2509.
- [2] 田军, 宋少娟. 数字化体层摄影与诊断图谱[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 1-2.
- [3] Ruttimann UE, Groenhuis RAJ, Webber RL. Restoration of digital multiplane tomosynthesised by a constrained iteration method[J]. IEEE Trans Med Imaging, 1984, 3(3): 141-148.
- [4] Godfrey DJ, McAdams HP, Dobbins JT. Stochastic noise characteristics in matrix inversion tomosynthesis (MITS)[J]. Med Phys, 2009, 36(5): 1521-1532.
- [5] 王巍, 刘传亚, 卢传友, 等. 数字合成 X 线体层成像原理与研究进展[J]. 医学影像学杂志, 2005, 15(7): 606-609.
- [6] Balcioglu HA, Kilic C, Akyol M, et al. Length of the styloid process and anatomical implications for Eagle's syndrome[J]. Folia Morphol (Warsz), 2009, 68(4): 265-270.
- [7] 葛合全, 郑奎宏, 王子军, 等. X 线数字断层融合技术在茎突综合征中的应用[J]. 军事医学, 2011, 35(6): 459-460.
- [8] Engelke W, Ruttimann UE, Tsuchimochi M, et al. An experimental study of new diagnostic methods for the examination of osseous lesions in the temporomandibular joint[J]. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1992, 73(3): 348-359.
- [9] Mermuys K, Vanslambrouck K, Goubau J, et al. Use of digital tomosynthesis: case report of a suspected scaphoid fracture and technique[J]. Skeletal Radiol, 2008, 37(6): 569-572.
- [10] Machida H, Yuhara T, Ueno E, et al. Detection of paranasal sinus opacification with digital tomosynthesis radiography: a clinical pilot study[J]. J Comput Assist Tomogr, 2013, 37(2): 252-256.
- [11] 刘焕珍, 田军, 张殿星, 等. 数字化断层融合对骨折诊断的应用价值[J]. 医学影像学杂志, 2012, 22(11): 1930-1933.
- [12] Pizones J, Castillo E. Assessment of acute thoracolumbar fractures: challenges in multidetector computed tomography and added value of emergency MRI[J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2013, 17(4): 389-395.
- [13] Welling RD, Jacobson JA, Jamadar DA, et al. MDCT and radiography of wrist fractures: radiographic sensitivity and fracture patterns[J]. AJR Am J Roentgenol, 2008, 190(1): 10-16.
- [14] Geijer M, Börjesson AM, Göthlin JH. Clinical utility of tomosynthesis in suspected scaphoid fracture. A pilot study[J]. Skeletal Radiol, 2011, 40(7): 863-867.
- [15] Wicky S, Blaser PF, Blanc CH, et al. Comparison between standard radiography and spiral CT with 3D reconstruction in the evaluation, classification and management of tibial plateau fractures[J]. Eur Radiol, 2000, 10(8): 1227-1232.
- [16] Hegenscheid K, Puls R, Rosenberg C, et al. Imaging strategies for knee injuries[J]. Radiologe, 2012, 52(11): 980-986.
- [17] Kalinosky B, Sabol JM, Piacsek K, et al. Quantifying the tibiofemoral joint space using x-ray tomosynthesis[J]. Med Phys, 2011, 38(12): 6672-6782.
- [18] 赵艳娥, 卢光明, 孙志远, 等. X 线数字断层融合技术在骨折石膏固定摄影中的应用[J]. 中国临床医学影像杂志, 2009, 20(10): 797-798.
- [19] Machida H, Yuhara T, Sabol JM, et al. Postoperative follow-up of olecranon fracture by digital tomosynthesis radiography[J]. Jpn J Radiol, 2011, 29(8): 583-586.
- [20] Gomi T, Hirano H. Clinical potential of digital linear tomosynthesis imaging of total joint arthroplasty[J]. Journal of Digital Imaging, 2008, 21(3): 312-322.
- [21] Sharp JT, Gardner JC, Bennett EM. Computer-based methods for measuring joint space and estimating erosion volume in the finger and wrist joints of patients with rheumatoid arthritis[J]. Arthritis Rheum, 2000, 43(6): 1378-1386.
- [22] Duryea J, Dobbins JT, Lynch JA. Digital tomosynthesis of hand joints for arthritis assessment[J]. Med Phys, 2003, 30(3): 325-333.
- [23] Devauchelle Pensec V, Saraux A, Berthelot JM, et al. Ability of hand radiographs to predict a further diagnosis of rheumatoid arthritis in patients with early arthritis[J]. J Rheumatol, 2001, 28(12): 2603-2607.
- [24] Wakefield RJ, Gibbon WW, Conaghan PG, et al. The value of sonography in the detection of skeletal erosions in patients with rheumatoid arthritis[J]. Arthritis Rheum, 2000, 43(12): 2762-2770.
- [25] Boesen M, Østergaard M, Cimmino MA, et al. MRI quantification of rheumatoid arthritis: current knowledge and future perspectives[J]. Eur J Radiol, 2009, 71(2): 189-196.
- [26] 李萍, 王正滨, 牛晓燕. 彩色多普勒超声诊断类风湿性关节炎手腕关节病变[J]. 中国医学影像技术, 2008, 24(10): 1625-1627.
- [27] Gurney-Champion OJ, Dahele M, Mostafavi H, et al. Digital tomosynthesis for verifying spine position during radiotherapy: a phantom study[J]. Phys Med Biol, 2013, 58(16): 5717-5733.
- [28] Wu QJ, Godfrey DJ, Wang Z, et al. On-board patient positioning for head-and-neck IMRT: comparing digital tomosynthesis to kilovoltage radiography and cone-beam computed tomography[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 69(2): 598-606.
- [29] Godfrey DJ, Ren L, Yan H, et al. Evaluation of three types of reference image data for external beam radiotherapy target localization using digital tomosynthesis (DTS)[J]. Med Phys, 2007, 34(8): 3374-3384.
- [30] Hwang HS, Chung MJ, Lee KS. Digital tomosynthesis of the chest: comparison of patient exposure dose and image quality between standard default setting and low dose setting[J]. Korean J Radiol, 2013, 14(3): 525-531.
- [31] Gomi T, Nozaki M, Takeda T, et al. Comparison of chest dual-energy subtraction digital tomosynthesis and dual-energy subtraction radiography for detection of pulmonary nodules: initial evaluations in human clinical cases[J]. Acad Radiol, 2013, 20(11): 1357-1363.
- [32] 陈永洲, 陈裕展. 数字化体层摄影在静脉肾盂造影中的应用[J]. 影像诊断与介入放射学, 2007, 16(2): 79-80.

(收稿日期: 2014-01-17)

(本文编辑: 吴莹)