

综述

超声与 CT 图像融合技术及其在脊柱外科中的应用进展

Research progress of ultrasound-CT image fusion technology and its applications in spine surgery

王天艺,袁 硕,范 宁,藏 磊

(首都医科大学附属北京朝阳医院西院骨科 100043 北京市)

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2021.01.13

中图分类号:R445.1,R445.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2021)-01-0086-05

随着脊柱外科手术的不断发展和图像导航手术(image-guide surgery, IGS)的应用日渐成熟,并且已被广泛应用于脊柱源性疼痛及腰椎间盘突出症、腰椎管狭窄症等腰椎退变性疾病的治疗,其应用显著增加了穿刺和螺钉置入的准确性^[1-2]。IGS 通过在屏幕上同时显示解剖结构与手术器械的位置信息,可以让术者实时地进行定位与调整。目前临床常用的方法为术中采集 X 线、CT、MRI 等实时图像来确定术中置钉以及穿刺的位置和准确性^[3-6]。但这些方法存在一定弊端,如辐射量大、设备操作烦琐、手术时间长及成本高等^[7-11];同时,由于术中透视生成图像为二维图像,使得初学者难以形成直观的理解进而导致穿刺困难,甚至出现出口神经根损伤或内脏损伤等并发症^[9]。

超声(ultrasound, US)检查作为一种无创、无放射性以及低成本的显像技术,得到了临床医师的广泛关注^[12]。但 US 对于脊柱结构,特别是小关节和椎间隙的显像质量较差,且椎体、软组织交界处与超声探头成角时,椎体表面难以清晰显像,故 US 单独应用显示术中骨、软骨结构存在一定困难^[13,14]。将术中实时超声图像与术前影像资料(包括 CT、MRI 等)进行配准,形成实时融合图像^[15,16],可以解决 US 对于解剖结构显像质量差的缺陷,或将成为脊柱外科手术中理想的显像定位方式。笔者旨在介绍术中 US 与术前 CT 融合技术及其在脊柱外科中的应用进展,为其进一步研究提供新思路。

1 US 与 CT 融合技术

IGS 的重要操作之一是术中患者解剖信息与术前影像资料进行配准。配准过程是指将术中患者特定解剖结构的位置信息与术前影像资料中提取的数据集经过一定的换算关系相互匹配。配准方法最初为基准、解剖标记物配准(landmark-based registration)^[10,17],其通过固定基准标

记物或利用侵入式探头获取术中患者位置信息,损伤较大,耗时长、精度受限等缺陷。为了解决这些问题,术中 X 线、CT、MRI 等实时图像被应用到临床实践中^[3-6],这些方法虽然提高了配准效率,但显像时产生的辐射会对患者和术者健康产生不利影响^[9]。超声引导下配准相比于前两种方式,具有无创、无放射性、成本低等优势^[12]。但如前文所述,由于图像质量差等问题,US 单独应用于脊柱外科手术同样存在困难。

US 图像与 CT 图像的融合技术是指将术中实时采集的超声信号与术前采集的 CT 图像信息进行配准,整合优化到同一图像中^[15,16],不仅可以获取术中实时解剖和器械位置信息,也可以提高解剖结构的显像质量。其主要流程见图 1。其中术中 US 图像获取过程为采用二维超声扫描仪沿脊柱轴向扫描采集二维超声水平断层图像,探头尾部安装有动态参照物(dynamic reference object, DRO),通过光学追踪、电磁追踪等方式对 DRO 进行空间定位,进而获取轴向位置信息,建立二维超声断面集^[10,18,19]。图像融合过程的关键步骤在于将 US 声波信号与 CT 密度信号数据进行恰当的翻译转换配准,以达到融合图像的精准性。过去 30 年间,多团队针对配准技术进行了大量的研究,不仅对上述的基准、解剖标记物配准进行了改进,应用体表基准标记物及 US 替代侵入式探头等无损伤方式获取术中位置信息,还探索出了包括基于特征的配准(feature-based registration)、基于灰度的配准(intensity-based registration)以及两者结合多层配准的方法。

1.1 基准、解剖标记物配准



图 1 术中超声与术前 CT 融合流程(实线部分为基本步骤,虚线部分为非必要步骤,在某些配准方法中应用到其中一项或多项)

基金项目:北京市科技计划项目(Z191100007619036)

第一作者简介:男(1997-),医学硕士研究生,研究方向:脊柱外科
电话:(010)51718282 E-mail:921158355@qq.com

通讯作者:藏磊 E-mail:zanglei@ccmu.edu.cn

基准标记物是指术前在患者体内或皮肤表面固定相应的标记,此标记在 US 与 CT 图像中都可清晰显示,常为金属钉或体表金属贴片;解剖标记物则是患者体内特定的解剖学结构,常用的有脊柱的棘突、横突等。配准方法为在术前 CT 图像中标出标记物的位置,并在术中用定位设备寻找标记物,利用电脑软件完成配准。

最初,基准、解剖标记物配准的术中定位由侵入式探头寻找置入体内的金属钉或特定解剖结构完成。Glossop 等^[20]术前在 CT 上挑选解剖标记点,术中将末端连有定位装置的探头手动触碰到这些标记点上,完成配准。此法对患者组织损伤大,且配准时间长。此后,Galiano 等^[21]采用皮肤金属贴片作为基准标记点,在术前固定后进行 CT 扫描,术中利用 US 寻找锁定完成配准,实现了无创性图像融合。但此研究未在术中应用解剖标记物配准,且未记录目标配准误差(target registration error,TRE)。刘彦斌等^[22]同样将金属贴片作为基准标记点,但其加入脊柱棘突作为解剖标记点,利用术前 CT 及术中 US 完成无创性基准及解剖标记点配准,提高了配准精度。王培培等^[23]应用带有电磁追踪器的体表基准标记物,省去 US 手动寻找基准标记物的步骤,优化了配准过程。

虽然基准、解剖标记物配准技术在近年来不断改进,但此方法耗时长,每个椎体平均配准时间 10~19min^[10,22],这将极大地延长手术时间;此外,该方法配准精度难以保障,术前图像信息采集的质量、术中手动寻找标记物的准确性、标记物相对位移都会对配准结果产生影响^[3]。

1.2 基于特征的配准

基于特征的配准首先需从 CT、US 图像中提取椎骨的表面信息,进而应用 1992 年由 Besl 和 McKay 提出的迭代最近点(iterative closest point,ICP)法^[24]及其改良方法进行配准。由于术中 US 图像存在噪声,并不能清晰显示全部椎骨表面,故此过程难点在于从 US 图像中提取椎骨表面信息,手动提取会增加手术时间和提取信息的不稳定性,而自动提取难以保证精度。Carrat、Tonetti 团队^[25,26]手动从 US 图像中提取骶骨表面信息与术前 CT 图像进行融合,但并未记录定量误差。Muratore 等^[27]在脊柱模型中自动提取 US 及 CT 的椎骨表面信息应用 ICP 进行配准,目标配准误差(target registration error,TRE)<2mm。Barratt 等^[28]和 Moghari 等^[29]分别提出了新算法用于图像配准过程,虽不同程度提高了配准的精度,但仍依赖手动提取 US 中椎骨表面信息,不具有普适性和稳定性。Rasoulilian 等^[30]对 Moghari 的方法进行了改进,同样采用涉及无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter,UKF)基于点融合的算法,在自动提取 US 中椎骨表面信息后进行配准,完成了多节段椎骨的融合。此方法虽然实现了自动 US 图像处理及多脊柱节段图像融合,但在体内试验 TRE 较高,限制了其在临床中的实用性。Hacihaliloglu 等^[31]提出了基于增强 US 图像中椎骨缘阴影面积的三重特征配准,大大增加了从 US 中提取椎骨表面信息的精确性。但提取时间平均为 9.3s,无

法满足临床中实时完成图像融合的需要;且并没有将提取的信息与 CT 图像融合,因此还需要进一步的探究。

1.3 基于灰度的配准及多层配准

基于灰度配准的提出最初是为了避免从 US 图像中提取椎骨表面信息这一较为困难的步骤。此技术假设 US 图像中最亮的像素通常是由声波在骨表面的反射造成的,因此将 CT 图像中提取的骨表面与 US 图像中重叠的像素平均强度最大化,使其直接配准至 US 数据集中。Brendel 团队^[32,33]利用其提出的协方差自适应进化策略(covariance matrix adaptation evolution strategy,CMA-ES)算法并加入 US 图像预处理过程,完成了基于灰度的配准,避免了 US 图像椎骨表面提取,其中基于临床数据的试验获得了 88.4% 的配准成功率。Yan 等^[10,34]提出了 US 后向射线追踪的方法,在背侧用探头接受由腹侧发来的声波信号,声波通过均匀低回声的骨质后在椎骨表面形成强回声,从而清晰在 US 中提取出椎体后表面,避免了软组织中回声强度不均的弊端。在其随后的研究中^[35],将 US 与 CT 的体-体配准改进为面-体配准,缩短配准时间至单椎骨 120s。由于术前 CT 采用的为仰卧位,而术中 US 为俯卧位,脊柱弯曲度不同,在多个椎体节段间进行刚性配准显然会产生误差。Gill 等^[14]设计了生物力学模型来代表椎体间的位移,将每个椎体作为独立单元同时融合。

虽然基于灰度的配准精度相对基于特征的配准有所提高,但 US 图像中会出现部分重叠的软组织回声高于骨表面的现象,使单纯基于灰度的配准精度受到限制。近年来,随着运算设备的不断改良以及临床需求的不断提高,多层配准技术得到了发展。其不仅结合了两种图像配准方法的优势,进一步提高了配准精度,同时降低了配准时间。Koo 等^[19]基于 Yan 等^[10]的配准方法设计了多层配准的工作框架,配准过程包括基于标记物配准、基于灰度的配准和限制性基于灰度的配准三阶段。在猪尸体实验中,平均 TRE 为 2.18mm,平均运算时间缩短到了 100s。Nagpal 等^[13]在一项基于临床数据的研究中,将 US 与 CT 图像首先进行整体基于灰度的配准,后进行整体基于点的配准,最后进行多椎骨节段点配准,TRE 范围在 0.71~1.70mm,运算时间范围在 50~185s,但没有计入手动选点的时间。Yan 团队^[17]在一项基于猪尸体的研究中,改进了预处理的过程,先后通过点配准和多尺度梯度配准,将平均 TRE 限制在 1.48mm,平均运算时间 10.79s,总配准时间<1min。但此算法只应用于单一椎体,并且局限在腰椎,还应进一步探究多椎体同时配准以及拓展到颈、胸椎的可能性。

2 US 与 CT 融合技术在脊柱外科中的应用

2.1 脊柱源性疼痛穿刺注射

脊柱源性疼痛(spinal pain,SP)的有效治疗方法之一为针对疼痛相关脊柱靶点如椎小关节、神经根等进行注射治疗^[1],此过程关键在于精准穿刺。目前临床多应用单纯 US 或放射性显像方式如 X 线、CT 引导术中穿刺。为了进

一步增强图像质量以及减少放射剂量,很多学者对应用 US-CT 图像融合技术完成这一过程的可行性进行了探索。Galiano 等^[21]以教学为目的率先尝试了应用 US-CT 图像融合进行神经根及椎小关节的穿刺,其采用基准标记点的配准方式完成图像融合后培训操作者识别融合图像中的解剖结构,进而在术前规划、术中融合图像引导下进行穿刺。但此研究并未记录 TRE、穿刺误差及时间。此后,Klauser 等^[26]在一项基于 10 例临床患者的试验中,利用解剖标记点配准完成图像融合后进行骶髂关节穿刺注射,平均 TRE 为 3.3mm,平均图像融合时间 15.4min,穿刺总时间 20.4min。

同样以疼痛注射治疗为研究背景,多位学者采用创新配准方式优化了图像融合过程。Rasoulia 等^[30]在基于模型和羊尸体的研究中,应用基于特征的配准方法,实现了自动 US 图像处理及多脊柱节段融合,模型组平均 TRE 为 2.44mm,羊尸体组平均 TRE 为 3.1mm。Gill 等^[14]利用基于灰度的配准,完成多椎体节段的融合,在羊尸体研究中,TRE 范围 0.62~2.26mm。Nagpal 等^[13]在一项基于临床数据的研究中,采用多重配准的方法,将 TRE 限制在 0.71~1.70mm,运算时间范围 50~185s。虽然配准方法不断改进,但以上试验均未进行进一步的穿刺操作,其临床实用性还有待后续研究证实。

2.2 置钉

近年来,图像导航技术在经皮椎弓根螺钉、骶髂关节螺钉置入等操作中已广泛应用。US-CT 图像融合技术作为一种低放射剂量、低成本的显像方式,很多学者对其在此领域的应用价值做出了研究。Tonetti 等^[26]在 4 例患者中采用基于特征的配准进行骶骨图像融合后实施骶髂关节螺钉置入,所有螺钉均成功置入,共 10 枚螺钉,但未记录 TRE 及置钉误差。Ma 等^[37]在一项基于模型和羊尸体的研究中,将术前 CT 和术中 US 获取的患者解剖结构三维立体点集应用最小二乘法进行基于点的配准后,在实时图像引导下进行置钉前克氏针穿刺定位,在模型实验中,平均 TRE 为 1.28mm,平均穿刺误差 3.35mm;在羊尸体实验中,平均穿刺误差 2.41mm,但未记录 TRE。

除以上研究中采用的基于特征的图像配准方法外,一些学者提出将基于灰度的配准及多重配准应用于此领域。Brendel 团队^[32]采用其团队提出的 CMA-ES 算法进行基于灰度的配准,将 TRE 上限定为 1mm,最终配准成功率 88.4%。Yan 团队^[10,34,35]采用 US 后向射线追踪提取椎体表面信息的方法,完成基于灰度的配准,在猪尸体实验中,TRE 的范围在 1.65~2.31mm。其随后的研究中应用多重配准,先后通过点配准和多尺度梯度配准,平均 TRE 为 1.48mm,平均运算时间 10.79s,总配准时间小于 1min^[18]。但上述研究未进行进一步穿刺置钉操作,还需进一步探究其临床可行性。

2.3 椎间孔镜下手术定位穿刺

椎间孔镜下手术作为重要的脊柱微创手术之一,具有软组织损伤小、术中出血少和术后恢复快等优势,现已

广泛应用于腰椎退变性疾病的治疗^[38]。椎间孔镜下手术中的一个重要步骤为定位穿刺过程。对此,学者们研究设计了许多新型辅助定位穿刺技术,如辅助穿刺定位器^[7,8,39,40]、计算机软件导航系统^[41,42]及计算机术前模拟规划路线^[43]等,在保障精度的同时有效减少了放射剂量,降低了学习难度。但图像融合技术由于可以获得术中实时图像,直观性强,具有不可比拟的优势。

近年来,国内学者对 US-CT 图像融合技术在椎间孔镜穿刺定位中的应用进行了大量研究。刘彦斌等^[22,44]于 2015 年首次提出将 US-CT 图像融合技术应用于椎间孔镜穿刺定位中,其主要利用基准及解剖标记点的配准方法,允许最大配准误差为 5mm,配准完成后进行手动穿刺,在 33 例临床患者的应用中,图像配准时间平均 15.5min,穿刺总时间平均 20.6min,TRE 平均 3.25mm,未统计穿刺误差,其中 3 例患者在穿刺过程中出现下肢放射痛,重新配准后穿刺成功。在其团队^[45]进一步的研究中,选择 29 例临床患者应用相同方法进行椎间孔镜穿刺定位,图像配准时间平均 13.7min,穿刺总时间平均 20.6min,未统计 TRE 及穿刺误差。此后,很多国内学者^[46-48]分别参照此方法进行进一步探究,平均穿刺总时间 14.3~20.1min,但均未统计配准时间、TRE 及穿刺误差。王培培等^[23]应用磁导航 US 系统在颈椎模型上进行穿刺,与上述研究不同,此研究应用电磁追踪技术实时追踪针尖位置,穿刺横向误差平均 2.88mm,纵向误差 1.64mm,穿刺成功率 91%,穿刺时间平均 3.72min,但未记录 TRE 及图像融合时间。除此之外,以上研究均发现,应用结合术中 US 的图像融合技术定位相比于术中 X 线、CT 定位,可有效减少术中放射暴露量,减少手术时间。

2.4 强直性脊柱炎

目前,彩色多普勒超声已应用于评估强直性脊柱炎中骶髂关节炎炎症活动性,在疾病的诊断和随访中起到重要作用。但单纯 US 难以显示强直性脊柱炎中异常血管化的位置和来源以及骶髂关节内的结构。Hu 等^[49]采用解剖标记点配准的方法,对 84 例临床患者在骶骨 3 个层面进行 US-CT 图像融合,允许最大配准误差为 5mm,配准成功率分别为 97.0%、87.5%和 79.8%,进而在成功融合的患者中观察到了异常血流信号的分布情况。

2.5 骨穿刺活检

由于 US 无法显示骨皮质内结构,骨穿刺活检中 US 的应用主要局限于伴有骨皮质破坏或骨外软组织成分的检查,常规骨穿刺活检仍在 CT 或 C 型臂 X 线机等放射性设备引导下进行^[50]。Garnon 等^[51]在一项基于 7 例临床患者的研究中,依据不同的穿刺位置选取不同的解剖标记点进行术中 US 与术前 CT 的配准,完成图像融合;在套管针上放置传感器,实时监测针尖位置,所有患者均成功提取病理标本,但最大穿刺误差 8mm,且未记录 TRE。所以还需进一步研究来证实 US-CT 图像融合技术在骨穿刺活检中应用的可行性。

3 US 与 CT 融合技术的不足与展望

总结国内外研究进展不难发现,US-CT 图像融合技术在脊柱外科中具有良好的应用价值。该技术不仅可降低置钉、穿刺中的放射剂量,减少手术时间,还在强直性脊柱炎等风湿性疾病诊断中有一定适用性。然而,此技术在临床应用过程中还存在一些问题。首先,相比于目前主流的术中显像方法如 O 型臂、C 型臂等,US-CT 图像融合技术需要更长的学习曲线,一些对 US 不熟悉的脊柱外科医生需要接受系统的培训。此外,目前应用在临床研究中的 US-CT 图像融合方法大多采用较原始的标记点配准法,术中仍需手动依次寻找标记点配准,平均配准时间在 13.7min 以上,手术时间无法缩短至理想范围内。除此之外,一方面,目前很少有研究能将图像融合技术的试验结果指标如 TRE、图像融合时间、穿刺及置钉误差等进行完整评价;另一方面,由于不同手术操作需求的图像融合精度不同,目前对 US-CT 图像融合精度并没有统一的规范。国外针对椎小关节穿刺以及置钉等操作中将 TRE 上限范围定为 2~3mm^[10,13,17,19,30,32,34,35];国内学者^[45]根据椎间孔的解剖特点,将应用于椎间孔镜定位穿刺操作中图像融合 TRE 上限暂定为 5mm。值得注意的是,5mm 的误差是根据椎间孔解剖特点提出的穿刺误差,而不是 TRE,若将 TRE 上限定为 5mm,穿刺误差可能超出临床接受范围,这也是上述研究中出现穿刺时神经放射痛的可能原因之一;而其他手术操作由于研究数量较少并没有相应的共识和标准,因此进一步全面制定评价标准是必要的。

综上所述,对于 US-CT 图像融合技术应用于脊柱外科的研究具有很好的发展前景。首先,可以通过引入基于特征、灰度以及多重配准等图像融合方法,探究其在临床中应用的可行性,进一步缩短手术时间,提高图像融合精度;其次,可以通过制定完善的图像融合结果评价指标来纵向、横向地分析在不同手术操作中图像融合技术的普适性和优越性。此外,随着计算机辅助穿刺技术的不断发展,我们可以尝试将术中图像融合与机器人辅助穿刺技术相结合,实现更精准、自动化手术需求。

4 参考文献

- Wang D. Image guidance technologies for interventional pain procedures: ultrasound, fluoroscopy, and CT[J]. Curr Pain Headache Rep, 2018, 22(1): 6.
- Smith ZA, Sugimoto K, Lawton CD, et al. Incidence of lumbar spine pedicle breach after percutaneous screw fixation a radiographic evaluation of 601 screws in 151 patients [J]. J Spinal Disord Tech, 2014, 27(7): 358-363.
- Costa F, Dorelli G, Ortolina A, et al. Computed tomography-based image-guided system in spinal surgery state of the art through 10 years of experience[J]. Oper Neurosurg, 2015, 11(1): 59-68.
- Shim E, Lee JW, Lee E, et al. Fluoroscopically guided epidural injections of the cervical and lumbar spine [J]. Radiol-

graphics, 2017, 37(2): 537-561.

- Makowski MR, Jonezyk M, Streitparth F, et al. Interactive near-real-time high-resolution imaging for MR-guided lumbar interventions using ZOOM imaging in an open 1.0 Tesla MRI system: initial experience[J]. Biomed Tech, 2015, 60(6): 533-539.
- Gebhard F, Weidner A, Liener UC, et al. Navigation at the spine[J]. Injury, 2004, 35(Suppl 1): 35-45.
- Fan G, Gu X, Liu Y, et al. Lower learning difficulty and fluoroscopy reduction of transforaminal percutaneous endoscopic lumbar discectomy with an accurate preoperative location method[J]. Pain Physician, 2016, 19(8): E1123-E1134.
- Fan G, Guan X, Zhang H, et al. Significant improvement of puncture accuracy and fluoroscopy reduction in percutaneous transforaminal endoscopic discectomy with novel lumbar location system: preliminary report of prospective hello study [J]. Medicine(Baltimore), 2015, 94(49): E2189.
- Rahmathulla G, Nottmeier EW, Pirris SM, et al. Intraoperative image-guided spinal navigation: technical pitfalls and their avoidance[J]. Neurosurg Focus, 2014, 36(3): E3.
- Yan CX, Coulet B, Pelletier J, et al. Towards accurate, robust and practical ultrasound-CT registration of vertebrae for image-guided spine surgery [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2011, 6(4): 523-537.
- Haque MA, Anderst W, Tashman S, et al. Hierarchical model-based tracking of cervical vertebrae from dynamic bi-plane radiographs[J]. Med Eng Phys, 2013, 35(7): 994-1004.
- Ye L, Wen C, Liu H. Ultrasound-guided versus low dose computed tomography scanning guidance for lumbar facet joint injections: same accuracy and efficiency[J]. BMC Anesthesiol, 2018, 18(1): 160.
- Nagpal S, Abolmaesumi P, Rasoulian A, et al. A multi-vertebrae CT to US registration of the lumbar spine in clinical data [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2015, 10(9): 1371-1381.
- Gill S, Abolmaesumi P, Fichtinger G, et al. Biomechanically constrained groupwise ultrasound to CT registration of the lumbar spine[J]. Med Image Anal, 2012, 16(3): 662-674.
- 巫明钢, 万绍平, 卢漫, 等. 超声容积导航在临床中的应用进展[J]. 实用医院临床杂志, 2019, 16(6): 245-247.
- Jung EM, Friedrich C, Hoffstetter P, et al. Volume navigation with contrast enhanced ultrasound and image fusion for percutaneous interventions: first results[J]. PLoS One, 2012, 7(3): E33956.
- Gueziri HE, Drouin S, Yan CX, et al. Toward real-time rigid registration of intra-operative ultrasound with preoperative CT images for lumbar spinal fusion surgery [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2019, 14(11): 1933-1943.
- Cha DI, Lee MW, Kim AY, et al. Automatic image fusion of real-time ultrasound with computed tomography images: a prospective comparison between two auto-registration methods [J]. Acta Radiol, 2017, 58(11): 1349-1357.
- Koo TK, Kwok WE. Hierarchical CT to ultrasound registration of the lumbar spine: a comparison with other registra-

- tion methods[J]. *Ann Biomed Eng*, 2016, 44(10): 2887-2900.
20. Glossop ND, Hu RW, Randle JA. Computer-aided pedicle screw placement using frameless stereotaxis[J]. *Spine*, 1996, 21(17): 2026-2034.
21. Galiano K, Obwegeser AA, Bale R, et al. Ultrasound-guided and CT-navigation-assisted periradicular and facet joint injections in the lumbar and cervical spine: a new teaching tool to recognize the sonoanatomic pattern [J]. *Reg Anesth Pain Med*, 2007, 32(3): 254-257.
22. 刘彦斌. 超声容积导航技术引导腰椎经皮后外侧入路完全内镜下微创手术椎间孔穿刺的应用研究 [D]. 第二军医大学, 2015.
23. 王培培, 肖常明, 晏铮剑, 等. 磁导航超声系统引导颈椎后路经皮内镜穿刺术的可行性研究[J]. *中华超声影像学杂志*, 2019, 28(6): 534-537.
24. Besl P, McKay H. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, 14(2): 239-256.
25. Carrat L, Tonetti J, Merloz P, et al. Percutaneous computer assisted iliosacral screwing: clinical validation[M]. New York: Springer, 2000. 1229-1237.
26. Tonetti J, Carrat L, Blendea S, et al. Clinical results of percutaneous pelvic surgery: computer assisted surgery using ultrasound compared to standard fluoroscopy [J]. *Computer Aided Surg*, 2001, 6(4): 204-211.
27. Muratore DM, Russ JH, Dawant BM, et al. Three-dimensional image registration of phantom vertebrae for image-guided surgery: a preliminary study[J]. *Comput Aided Surg*, 2002, 7(6): 342-352.
28. Barratt DC, Penney G, Chan CS, et al. Self-calibrating ultrasound-to-CT bone registration [M]. New York: Springer, 2005. 605-612.
29. Moghari MH, Abolmaesumi P. Point-based rigid-body registration using an unscented Kalman filter[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2007, 26(12): 1708-1728.
30. Rasoulia A, Abolmaesumi P, Mousavi P. Feature-based multibody rigid registration of CT and ultrasound images of lumbar spine[J]. *Med Phys*, 2012, 39(6): 3154-3166.
31. Hacıhaliloglu I. Enhancement of bone shadow region using local phase-based ultrasound transmission maps [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(6): 951-960.
32. Winter S, Brendel B, Pechlivanis I, et al. Registration of CT and intraoperative 3-D ultrasound images of the spine using evolutionary and gradient-based methods [J]. *IEEE Trans Evolut Comput*, 2008, 12(3): 284-296.
33. Brendel B, Rick SWA, Stockheim M, et al. Registration of 3D CT and ultrasound datasets of the spine using bone structures[J]. *Comput Aided Surg*, 2002, 7(3): 146-155.
34. Yan CX, Goulet B, Chen SJS, et al. Validation of automated ultrasound-CT registration of vertebrae [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2012, 7(4): 601-610.
35. Yan CX, Goulet B, Tampieri D, et al. Ultrasound-CT registration of vertebrae without reconstruction [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2012, 7(6): 901-909.
36. Klauser AS, De Zordo T, Feuchtner GM, et al. Fusion of real-time US with CT images to guide sacroiliac joint injection in vitro and in vivo[J]. *Radiology*, 2010, 256(2): 547-553.
37. Ma L, Zhao Z, Chen F, et al. Augmented reality surgical navigation with ultrasound-assisted registration for pedicle screw placement: a pilot study [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(12): 2205-2215.
38. Zhao YZ, Bo XW, Wang CF, et al. Guided punctures with ultrasound volume navigation in percutaneous transforaminal endoscopic discectomy: a technical note[J]. *World Neurosurg*, 2018, 119: 77-84.
39. Fan G, Han R, Gu X, et al. Navigation improves the learning curve of transforaminal percutaneous endoscopic lumbar discectomy[J]. *Int Orthop*, 2017, 41(2): 323-332.
40. Zeng Y, Bao J, Su J, et al. Novel targeted puncture technique for percutaneous transforaminal endoscopic lumbar discectomy reduces X-ray exposure[J]. *Exp Ther Med*, 2017, 14(4): 2960-2968.
41. Chen X, Cheng J, Gu X, et al. Development of preoperative planning software for transforaminal endoscopic surgery and the guidance for clinical applications[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(4): 613-620.
42. 谭海涛, 黄圣斌, 谢兆林, 等. 导航导杆在椎间孔镜穿刺定位的应用[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27(4): 339-343.
43. 王明政, 郑兆君, 张伟, 等. 介绍一种椎间孔镜手术简易定位方式[J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28(7): 653-655.
44. Liu YB, Wang Y, Chen ZQ, et al. Volume navigation with fusion of real-time ultrasound and CT images to guide posterolateral transforaminal puncture in percutaneous endoscopic lumbar discectomy[J]. *Pain Physician*, 2018, 21(3): E265-E278.
45. 付强, 刘彦斌, 李军, 等. 超声容积导航技术引导椎间孔镜穿刺技术的应用[J]. *中华骨科杂志*, 2016, 36(1): 1-8.
46. 许波. 超声容积导航定位腰椎间孔下椎间孔镜技术的临床应用研究[J]. *影像研究与医学应用*, 2017, 1(5): 151-152.
47. 彭运飞, 游浩, 张栋. 影像设备引导下椎间孔镜穿刺效果研究[J]. *中国内镜杂志*, 2018, 24(2): 80-84.
48. 王冰, 刘涛. 超声容积导航与 X 线透视引导下椎间孔镜技术治疗腰椎间盘突出症的临床对比[J]. *颈腰痛杂志*, 2019, 40(3): 370-372.
49. Hu Z, Zhu J, Liu F, et al. Feasibility of US-CT image fusion to identify the sources of abnormal vascularization in posterior sacroiliac joints of ankylosing spondylitis patients[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 18356.
50. Tselikas L, Joskin J, Roquet F, et al. Percutaneous bone biopsies: comparison between flat-panel cone-beam CT and CT-scan guidance[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2015, 38(1): 167-176.
51. Garnon J, Koch G, Tsoumakidou G, et al. Ultrasound-guided biopsies of bone lesions without cortical disruption using fusion imaging and needle tracking: proof of concept [J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2017, 40(8): 1267-1273.

(收稿日期:2020-05-19 末次修回日期:2020-08-26)

(本文编辑 卢庆霞)