

论著·胸部

经食道超声对CT配准治疗心律不齐的研究*

薛军¹ 吴迪¹ 王旭²郑金刚³ 范煜东^{1,*}

1.国家应急医学研究中心(应急总医院)

心内科(北京 朝阳 100028)

2.国家应急医学研究中心(应急总医院)

影像科(北京 朝阳 100028)

3.中日友好医院心血管内科

(北京 朝阳 100100)

【摘要】目的 旨在探讨经食道超声对CT配准治疗心律不齐的价值。方法 回顾性分析本院于2023年4月至2024年4月期间收治的HIFU治疗的心律失常患者50例。重建适合治疗的术前CT图像模型,使用变换矩阵将2D US配准到3D CT体积,并评价模型质量。结果 对患者CT数据进行处理,以获得基于食道的体积重建。对于食道中的所有三个探头位置,所有TEE探头位置的所有基准标记的整体平均误差测量为4.03 mm。利用US图像的最佳2D-2D配准结果重新格式化CT切片的变换矩阵将IUS的基准点投影到VPRE。对于接近TEE插入点的两个US图像,MTRE为3.5 mm,而对于距离插入点较远的第三个图像,MTRE增加到9.5 mm。结论 本研究提出了一种新的2D-US到3D-CT的配准方法,适用于指导经食道HIFU治疗心房颤动。

【关键词】食道超声; CT配准; 心律不齐

【中图分类号】R322.4+3

【文献标识码】A

【基金项目】北京心联智成心血管健康公益基金会
CSC临床研究专项基金(CSCF2021B02)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.06.021

Study on CT Registration of Transesophageal Ultrasound in the Treatment of Arrhythmia*

XUE Jun¹, WU Di¹, WANG Xu², ZHENG Jin-gang³, FAN Yu-dong^{1,*}.

1.Department of Cardiology, National Emergency Medicine Research Center(Emergency General Hospital), Beijing 100028, China

2.Department of Imaging, National Emergency Medicine Research Center (National Emergency General Hospital), Beijing 100028, China

3.Department of Cardiology, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100100, China

ABSTRACT

Objective To investigate the value of transesophageal ultrasound in CT registration for the treatment of arrhythmia. **Methods** Retrospective analysis was performed on 50 patients with arrhythmia treated with HIFU in our hospital from April 2023 to April 2024. Preoperative CT image model suitable for treatment was reconstructed, 2D US was registered to 3D CT volume using transformation matrix, and model quality was evaluated. **Results** CT data of patients were processed to obtain volume reconstruction based on esophagus. For all three probe positions in the esophagus, the overall mean error measurement for all reference marks at all TEE probe positions was 4.03 mm. Using the best 2D-2D registration results of US images, the transform matrix of CT sections was reformatted to project the reference point of IUS to VPRE. For the two US images close to the TEE insertion point, the MTRE is 3.5 mm, while for the third image farther away from the insertion point, the MTRE increases to 9.5 mm. **Conclusion** In this study, a new 2D-US to 3D-CT registration method is proposed, which is suitable for guiding the treatment of atrial fibrillation through esophageal HIFU.

Keywords: Esophageal Ultrasound; CT Registration; Arrhythmia

当抗心律失常药物无效时,导管消融是治疗心律失常的常用方法^[1]。随着高强度聚焦超声(HIFU)的发展,其可开发引入食道来非侵入性且更有效地治疗心律失常^[2]。HIFU探头结合了超声(US)换能器,使HIFU治疗可以在US-2D解剖成像下实时提供^[3]。为了加强对经食道HIFU心脏消融的指导,我们提出了一种术前高分辨率CT解剖三维成像与术中二维超声图像相结合的方法,这将有助于将HIFU焦点调整到计划消融路径上^[4]。然后,在使用所获取的2D-US图像的跟踪信息重建的CT体积和US体积之间执行最终配准。然而,诸如准确性、对金属干扰敏感性、对经食道探头硬件要求、介入前传感器校准以及重复使用传感器准确性损失等缺点使得在临床常规工作流程中集成电磁跟踪非常复杂^[5]。因此,我们对术中2D US和术前CT进行准,以为临床诊治提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料 回顾性分析本院于2023年4月至2024年4月期间收治的HIFU治疗的心律失常患者50例。研究主要分成两个阶段:(1)根据食道特征重新格式化术前CT数据集,其主要目的是提供潜在地具有与未来TEE US-2D图像相同的空间位置的CT 2D切片;(2)术中US图像和在前一阶段获得的重新格式化的CT 2D切片之间基于强度的配准。

1.2 模型研究方法 本研究模型计算方法参照近年发表的文献进行^[6-7],即重新重建目的是观察CT上的解剖结构,TEE探头从特定插入点插入到深度食道中。我们假设以零度方向采集2D US TEE图像,因此图像位于垂直于探头轴的轴向平面上。基于我们的假设,探头的轨迹受食道的约束,在插入期间,US图像将是一组垂直于食道中心线的平面。我们建议创建一个适合于治疗的术前体积计算模板,它由垂直于食管轴的所有截面组成。这个新体积的参考值被设置为(OEND; Xther, Yther, D),OEND是经食道探头的插入点;d轴对应于食道的中心线;Xther还定义了成像平面。重建适合于治疗的术前CT图像分为三个步骤:(1)从术前体积中分割出食道;(2)将中心线定义为光滑函数;(3)利用中心线信息对CT进行重采样^[8]。在本节中,我们将执行特定US和体积之间的配准。由于TEE是心电门控的,我们能够从US序列中选择与CT体积相同的心动时相对应的帧。从获取的序列中同时手动选择要配准的US图像IUS,配准包括在IUS和特定处的Vther的(Xt, Yt)切片之间执行2D-2D配准。我们将整个过程分为三个步骤:(1)在Vther中找到切片的候选区域;(2)对该区域的所有切片执行US 2D-CT二维配准;(3)估计探头在该区域中的最可能深度位置^[9]。

1.3 统计学方法 所有数据分析用SPSS 25.0软件进行,P值<0.05被认为具有统计学意义。CT体素强度值与Hounsfield标度有关,Hounsfield标度给出了关于每个组织的相对全局的信息。基于特征需要选取感兴趣区域,使用交互信息(MI)模式直接比较CT和US心脏图像。

2 结果

2.1 以食道为基础的容积血管及模型分析 如图1上所示,从50例患者节段性食管点中

【第一作者】薛军,男,主治医师,主要研究方向:冠状动脉性心脏病诊断治疗、心脏大血管超声诊断。E-mail: sufangjibg31@163.com

【通讯作者】范煜东,男,副主任医师,主要研究方向:心血管疾病、冠状动脉疾病。E-mail: sufangjibg31@163.com

拟合出一条平滑中心线。根据该食道中心线，对物理体模CT数据进行处理，以获得基于食道的体积重建。

如图1下所示，CT重建的心肌形态与US图像中的心肌相似。

然而，由于散斑的大小，所获得的超声具有较高的边界色散。心肌壁在超声图像上被认为比在CT体积上更大，基准点周围的误差是可见的。

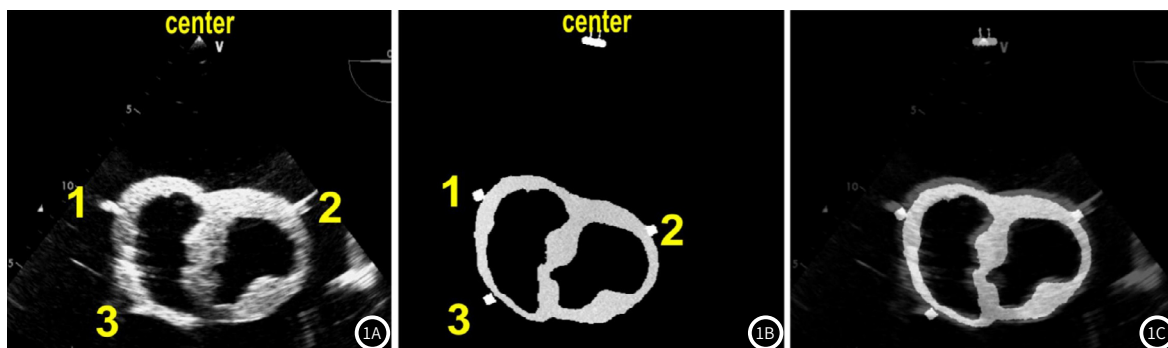
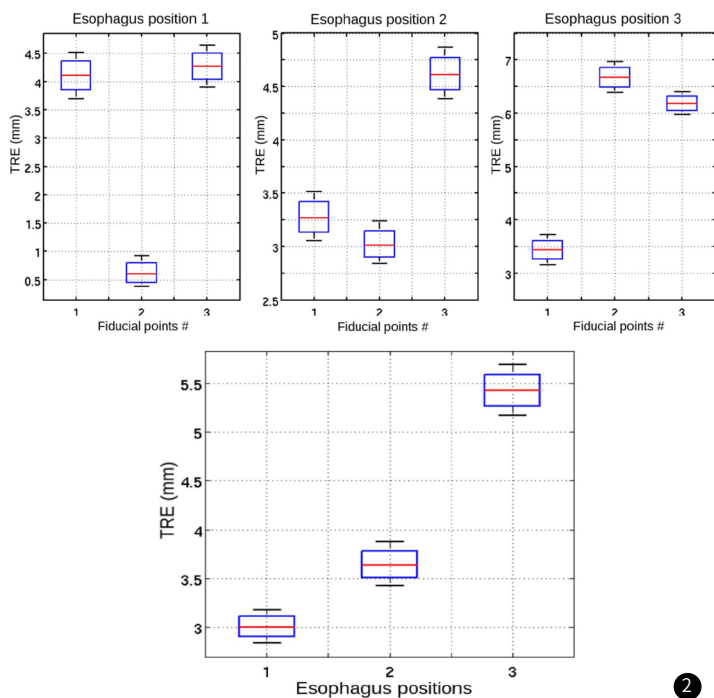


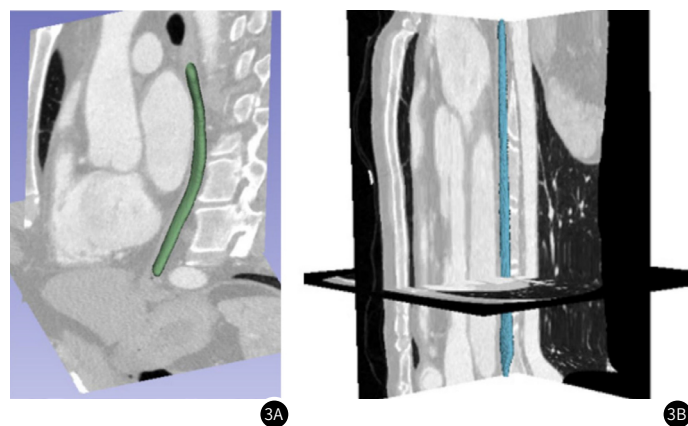
图1A-图1C (1A)在TEE探头位置1处从食道体模获取的超声图像；(1B)从心脏模型分割后获得的体积、标记和TEE探头位置1处的探头尖端重新格式化的CT图像；(1C)无标记结果。

2.2 模型结果分析 具体如图2所示，显示了每个T形探头位置的每个基准点的TRE的框图。对于食道中的所有三个探头位置，我们的最小误差小于3.5 mm，MTRE范围在3 mm到5.5 mm之间。所有TEE探头位置的所有基准标记的整体平均误差测量为4.03 mm。

2.3 以食道为基础的容积血管分析 具体如图3所示，食道分割的结果如图3A所示。基于食道的重新格式化体积 V_{ther} 如图3B所示。在配准之后将IUS叠加到相应的重新格式化的切片,使用估计的最终变换矩阵将最终2D US配准到3D。



2



3A

3B

图2 每个T形三通探头位置的每个基准点上的TRE的框图。

图3A-图3B 上图：基于食道的体积构建步骤：(3A)食道分割；(3B)基于食道的重建的体积。

2.4 临床研究结果分析 具体如图4所示，我们在US图像(图4A)和3D CT体积(图4B)中标记了一些相应的基准点。利用US图像的最佳2D-2D配准结果重新格式化CT切片(图4C)的变换矩阵将IUS的基准点投影到VPRE。这使我们能够确定每个基准点的TRE(图

4D)。此外，研究还显示食道内三个不同深度的TRE的盒子图。对于接近TEE插入点的两个US图像，MTRE为3.5 mm，而对于距离插入点较远的第三个图像，MTRE增加到9.5 mm。

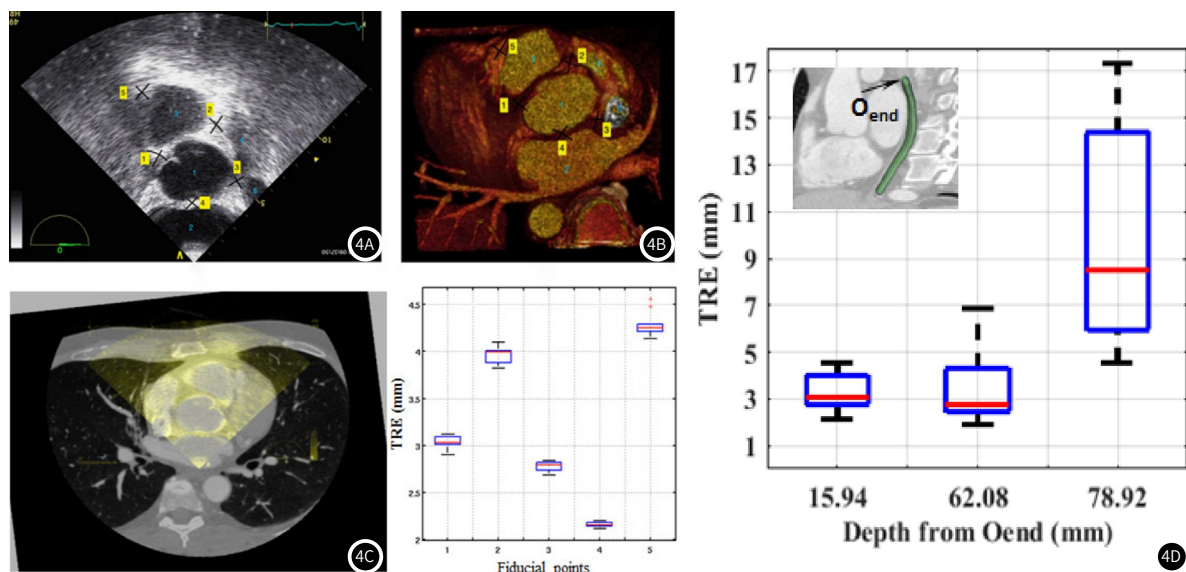


图4A-图4D (4A) US图像和(4B) CT标记的基准点。(4C) US图像和重新格式化的CT切片的最佳2D-2D配准结果。(4D) 食道内三个不同深度TRE的盒子图。

3 讨论

本研究中基准点的误差表明,考虑到探头的机械收缩,对于所有窗口最接近顶点的点的误差并不是最小的^[10]。由于误差显示了重建切片的倾斜度,但没有全局趋势,因此我们认为重建对中心线的微小变化很敏感^[11]。在中心线提取中可能产生这些微小变化的主要误差来源之一是模体图像中的食道分割过程分割是具有挑战性的,因为所获取的模型图像呈现由支撑模型的框架引入的一些伪影^[12]。如图2所示,我们可以看到误差随着深度的增加而增加。较大的误差对应于距离插入点最远的探头。从测量结果可以得出结论,随着深度的增加,探头会偏离中心线。探头尖端获得了一定的自由度,因此它可以远离估计的食道中心线^[13]。

从图4中,我们可以观察到,误差随着T形三通尖端在食道中的进展而增加,因而通过考虑预估姿势作为在其周围配准的起点,可能会获得一些更高的精度。其结果将是计算时间上的代价^[14]。有研究使用3D-TEE图像进行配准,并在US图像中手动分割目标,发现需要手动选择横截面才能进行良好的初始化^[15]。也有研究使用了X射线作为术中中间成像系统^[16],并结合了成像尖的3D模型,发现其准确性似乎也在可接受的治疗误差范围内。因此,我们可以假设US和CT之间的相关性应该在1厘米以下,但必须对经食道HIFU和心脏消融术进行一些剂量学研究来证实这一假设^[17]。本研究配准步骤的可行性直接关系到精确的食道中心线估计,一方面平滑的样条线弥补了手动提供的分割不确定性^[18]。另一方面,一种更自动、更准确的分割方法可以克服这一局限性。在没有优化的情况下,注册过程所需的时间约为 5.11 ± 0.98 S,这对于术中的实时使用是不可接受的^[19]。这些时间主要花在2D/2D配准程序上,通过实施最新的优化方法和使用GPU,可以加速2D/2D配准程序^[20-21]。

综上所述,我们提出了一种新的2D-US到3D-CT的配准方法,适用于指导经食道HIFU治疗心房颤动。与其他方法相比,只需要手动初始化并且不需要耗时手动预定位或选择横截面。

参考文献

- [1] 韩万博, 卞立新. CT血管造影在县域地区中老年人冠状动脉疾病诊断中的价值[J]. 中华消化病与影像杂志(电子版), 2023, 13(6): 530-531.
- [2] 李莹莹. 24h动态心电图参数对急性心肌梗死患者恶性室性心律失常的指导意义研究[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(10): 43-45.
- [3] STEVENS R, HAZELAAR C, BOGOWICZ M, et al. A framework for assessing the effect of cardiac and respiratory motion for stereotactic arrhythmia radioablation using a digital phantom with a 17-segment model: a STOPSTORM.eu consortium study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2024, 118(2): 533-542.
- [4] BABIC M, DJURDJEVIC B, VUKAJLOVIC D, et al. Catheter ablation of atrial tachycardia after pulmonary vein isolation in a patient with common ostium of inferior pulmonary veins: case report[J]. Medicina (Kaunas), 2024, 60(2).

- [5] IZEKOR B E, LOVELACE J, GIANG T K, et al. Idioventricular rhythm: a rare presentation of left ventricular pseudoaneurysm following radiofrequency ablation[J]. Cureus, 2024, 16(2): e55272.
- [6] BAIG M A, ELMOGY A, HEGAZY Y, et al. Unleashing an underlying serious cardiac arrhythmia: a case of coronary vasospasm with atypical presentation[J]. Cureus, 2024, 16(2): e54971.
- [7] FUJIOKA K, NORIKANE T, TAKAMI Y, et al. Feasibility of (11)C-Pittsburgh compound B positron emission tomography/computed tomography for treatment monitoring with Tafamidis in a patient with transthyretin cardiac amyloidosis[J]. J Nucl Cardiol, 2024: 101800.
- [8] ROSU-BUBULAC M, TRANKLE C R, MANKAD P, et al. Institutional experience report on the target contouring workflow in the radiotherapy department for stereotactic arrhythmia radioablation delivered on conventional linear accelerators[J]. Strahlenther Onkol, 2024, 200(1): 83-96.
- [9] TEIXEIRA B L, CUNHA P S, JACINTO A S, et al. Epicardial adipose tissue volume assessed by cardiac CT as a predictor of atrial fibrillation recurrence following catheter ablation[J]. Clin Imaging, 2024, 110: 110170.
- [10] 禹短, 李岩, 沈翀, 等. 心律不齐患者自适应前瞻性心电触发窄窗冠状动脉CT血管成像扫描的可行性[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(04): 386-389.
- [11] FUJIOKA K, NORIKANE T, TAKAMI Y, et al. Feasibility of PiB positron emission tomography/computed tomography for treatment monitoring with Tafamidis in a patient with transthyretin cardiac amyloidosis[J]. J Nucl Cardiol, 2024, 33: 101816.
- [12] MCALPIN P, PURLEE M, DICKEY A, et al. Case report: Multimodality evaluation and clinical management of a single coronary artery[J]. Front Cardiovasc Med, 2023, 10: 1295602.
- [13] KHAN A A, KHAN M A, COHEN C. Letter to the Editor regarding How can artificial intelligence enhance the role of CT in arrhythmia management? [J]. Br J Radiol, 2024, 97(1154): 477-478.
- [14] SARMIENTO J, CASIS R M, OPINALDO P. Understanding the brain-heart connection through a case of angry glioma syndrome[J]. Brain Tumor Res Treat, 2024, 12(2): 121-124.
- [15] YU X, LI X, XIA S, et al. A study of clinical and serological correlation of early myocardial injury in elderly patients infected with the Omicron variant[J]. Front Cardiovasc Med, 2024, 11: 1268499.
- [16] WU B, ATWOOD T, MUNDT A J, et al. Characterizing cardiac contractile motion for noninvasive radioablation of ventricular tachycardia[J]. Heart Rhythm, 2024, 5(2): 131-136.
- [17] WEIDLICH M, HAMM B, SCHAAPS L A, et al. Epicardial fat volume and its association with cardiac arrhythmias in CT coronary angiography[J]. Pol J Radiol, 2024, 89: e122-e127.
- [18] 王真真, 张海波, 李运丽. 急性心肌梗死介入术后新发室性心律失常的相关因素分析[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31(11): 56-57.
- [19] KING S A, JENKINS J D, LIVESAY J, et al. Coronary artery calcification and risk of cardiac complication in geriatric trauma population[J]. J Am Coll Surg, 2024, 238(4): 762-767.
- [20] SHAH H, ALIM S, AKTHER S, et al. Update on cardiac imaging: a critical analysis[J]. Clin Investig Arterioscler, 2024.
- [21] 冯晓刚, 杨瑞, 刘继伟, 等. 心律不齐老年患者冠状动脉与主动脉一站式CTA检查方案优化的研究[J]. 影像诊断与介入放射学, 2023, 32(06): 437-443.

(收稿日期: 2024-05-23)

(校对编辑: 翁佳鸿)