

前沿述评

人工耳蜗植入术后CT影像学评估的临床价值及进展

顾文汐^{1,2,3}, 贾欢^{1,2,3}, 吴皓^{1,2,3}

1. 上海交通大学医学院附属第九人民医院耳鼻咽喉头颈外科, 上海 200011; 2. 上海市耳鼻疾病转化医学重点实验室, 上海 200125; 3. 上海交通大学医学院耳科学研究所, 上海 200125

[摘要] 人工耳蜗植入术是治疗重度及极重度感音神经性聋的儿童和成人患者的主要手段。电极在耳蜗内的位置是影响术后听力言语康复效果的重要因素之一, 术后残余听力的保存与电极植入过程中对内耳结构的损伤程度密切相关, 适当的植入深度和理想的电极位置对于良好的频率识别至关重要。植入后的影像学检查包括X线片和计算机断层扫描术 (computed tomography, CT)。相比X线片, CT具有三维成像的优势。通过植入术后的CT影像学检查和评估, 能够明确电极的完整程度, 有助于确保手术的安全性和辅助术后调机或故障分析。基于CT影像学的三维重建方法让电极位置的评估更加直观和准确, 有助于判断植入过程对于内耳精细结构损伤的程度, 分析对听觉、言语预后的影响。人工耳蜗植入后的CT影像学评估在推动电极设计、改进手术技巧、推广机器人或手术导航等新手段的应用等方面功不可没, 越来越受到有关研究者的关注。该文就人工耳蜗植入术后CT影像学评估的临床应用价值和技术进展等进行述评。

[关键词] 人工耳蜗植入术; 计算机断层扫描术; 多平面重建; 三维融合重建

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2023.12.001 **[中图分类号]** R764.35 **[文献标志码]** A

Clinical values and advances in computed tomography evaluation after cochlear implantation

GU Wenxi^{1,2,3}, JIA Huan^{1,2,3}, WU Hao^{1,2,3}

1. Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Translational Medicine on Ear and Nose Diseases, Shanghai 200125, China; 3. Ear Institute, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200125, China

[Abstract] Cochlear implantation has been a standard rehabilitation for children and adult patients with severe to profound sensorineural deafness. The intracochlear localization of the electrode array is one of the key factors related to the postoperative auditory and speech outcomes. Preservation of the residual hearing is related to the trauma to the inner ear structures caused in the insertion process. Optimal insertion depth and positioning of the electrode array is important for frequency discrimination. The post-operative position of the electrode array is evaluated by using plain X ray or computed tomography (CT). Compared to the plain X ray, CT produces three-dimensional (3D) imaging. With the application of post-operative CT evaluation, the integrity of the electrode array can be verified for surgical safety and improving programming accuracy. Different 3D reconstruction techniques and methods based on the post-operative CT imaging have been proposed to facilitate the precise recognition of position of each electrode, thus helpful to evaluate the possible insertion trauma to inner ear structures and the potential effect on auditory and speech outcomes. The post-operative CT evaluation has helped the electrode array design, brought progress to the soft surgery procedure and promoted new technologies such as robotic surgery and navigation. Therefore, it is getting more and more attention. This article reviews the clinical application values and the progress of techniques in post-operative CT evaluation of cochlear implantation.

[Key words] cochlear implantation; computed tomography (CT); multiplanar reconstruction; 3D fusion reconstruction

[基金项目] 上海市耳鼻疾病转化医学重点实验室 (14DZ2260300); 上海交通大学医学院转化医学协同创新项目 (TM202011); 上海交通大学医疗机器人研究院项目 (IMR-NPH202001); 上海市临床重点专科建设项目 (shslczdk00802); 上海申康医院发展中心临床创新三年行动计划 (SHDC2020CR1044B)。

[作者简介] 顾文汐 (1996—), 女, 博士生; 电子信箱: GU_Wenxi@icloud.com。

[通信作者] 吴皓, 电子信箱: wuhao@shsmu.edu.cn。

[Funding Information] Shanghai Key Laboratory of Translational Medicine on Ear and Nose Diseases (14DZ2260300); Translational Medicine Collaborative Innovation Project of Shanghai Jiao Tong University School of Medicine (TM202011); Project of Institute of Medical Robotics of Shanghai Jiao Tong University (IMR-NPH202001); Shanghai Key Clinical Specialty Construction Project (shslczdk00802); Three-year Action Plan for Clinical Innovation of Shanghai Hospital Development Center (SHDC2020CR1044B).

[Corresponding Author] WU Hao, E-mail: wuhao@shsmu.edu.cn.



人工耳蜗植入术已成为治疗重度至极重度感音神经性聋患者的常用方法。患者术后的听觉和言语康复效果受到许多因素影响,其中之一就是植入电极在耳蜗内的位置和形态^[1]。术后的影像学检查评估,能够确定电极所在的位置,排除可能存在的位置不当,评估电极位置对于耳蜗内精细结构的损伤程度、对于术后听力的影响等,有助于指导微创手术进步、辅助术后电极调试、改良电极设计,从而更好地保存残余听力,提高患者术后的听觉获益水平,因此越来越受到国内外学者和医师的关注。本文就近年来人工耳蜗植入术后计算机断层扫描术(computed tomography, CT)影像学评估的技术手段、临床价值及应用和方法进展述评如下。

1 人工耳蜗植入术后影像学评估的技术手段

目前国内外的标准、指南中尚未明确要求人工耳蜗植入术后进行常规影像学评估,但许多中心都会在术后进行X线片或CT检查从而评估电极在内耳内的位置。

X线片检查具有操作简便、成本低和放射剂量低等优点,二维图像能显示人工耳蜗植入体接收器、连线及电极的全貌。最常用的摄片方法为传统或改良版斯氏位(岩部斜位)视图,可显示蜗内电极整体的位置和走行,也可以评估电极植入深度和角度^[2]。但X线片存在平面成像、分辨率低等不足,对于电极在耳蜗内的空间位置显示度不佳。

随着CT的出现,三维成像成为现实。基于CT的术后影像学评估手段能够从三维角度精细分析电极在耳蜗内的具体位置。高分辨率CT(high-resolution CT, HRCT)的应用改善了成像质量,提高了空间分辨率,缩短了扫描时间,减少了拍摄时期患者活动导致的伪影^[3]。HRCT可以清晰显示植入电极与周围骨性组织的关系,借助相关的重建手段,可以分辨出电极在耳蜗内的具体位置。与HRCT需要多次旋转射线束来成像不同,锥形束CT(conebeam CT, CBCT)只需要旋转一次射线束,辐射量约为传统CT的1/20^[4]。O型臂(O-arm)作为CBCT的一种,可以灵活移动,能满足术中摄片的需求,也被用于人工耳蜗植入术后的影像学评估以确认电极位置^[5]。相比传统CT, CBCT在金属显影时伪影更少,但不同制

造商的设备在成像质量上存在一定差别^[6]。

目前,基于CT的影像学评估手段逐渐成为精细化研究人工耳蜗电极植入情况的重要方法,在世界范围内的许多中心也逐渐成为常规的检查手段^[3,7-8]。

2 人工耳蜗植入术后CT影像学评估的临床价值及应用

2.1 判断电极是否植入耳蜗

对于内耳解剖结构正常的植入者,将电极正确植入耳蜗内并不十分困难。但患者存在内耳解剖结构畸形的情况时,可能会影响电极的正常植入,需要完善术后CT影像学检查,判断电极与耳蜗的位置。据报道^[9],植入人工耳蜗电极的儿童患者中有近1/3存在不同程度的内耳畸形。例如CHARGE综合征的患儿由于常存在中耳解剖异常,导致人工耳蜗植入术中解剖标志辨认欠清;BIRMAN等^[10]对该类患儿进行人工耳蜗植入术后的CT影像显示,电极未能植入耳蜗底圈,停留在圆窗龛附近,还在鼓室腔里未进入内耳。耳蜗分隔不全Ⅲ型(incomplet partition type Ⅲ, IP-Ⅲ)的患者耳蜗和内听道没有骨性分隔,导致电极可能从耳蜗滑入内听道^[11]。此外,即使内耳形态正常,当耳蜗开窗角度不正确时,电极也可能误入前庭或半规管^[12];亦有由于术中下鼓室气房影响圆窗辨认,进而导致电极植入颈动脉管或咽鼓管^[13]的报道。诸如此类的错误植入位置导致人工耳蜗无法发挥作用,甚至可能危害患者的健康。因此有必要完善术后CT影像学分析判断电极是否植入耳蜗,为必要时取出电极、重新植入提供临床依据,并预防严重并发症的出现。

2.2 判断电极在耳蜗内的异常形态和位置及植入损伤

人工耳蜗电极在耳蜗内的位置和形态是影响术后听力获益的重要因素之一。电极在耳蜗内的异常形态和位置,对残余听力的保存、术后听力言语的获益均有不同程度的影响,甚至会影响电极的正常运行。组织学方法是判断术后电极位置以及植入损伤的金标准,但无法应用于临床。而利用术后CT影像学检查,可以明确人工耳蜗每个电极在耳蜗内的具体位置,判断常见的异常形态和位置及植入损伤。

(1) 打弯、折叠:当植入电极线过于用力,或电极线不能再继续深入但强行推进时,底圈的电极可出

现弯曲甚至折叠,造成电极本身的机械损伤。CT上可以显示出电极线弯折的具体位置和严重程度。影像学研究^[8]发现,抱轴电极由于相对柔软,在植入时,比直电极更容易发生顶端的打弯。由于不同电极的电刺激频率不同,因此当出现电极线折叠的情况时,需要停用折叠处的部分电极^[14]。

(2) 植入深度不足或过深:人工耳蜗的每一个电极有固定的刺激频率,当电极植入深度不足使得末尾若干电极未能植入耳蜗,会影响人工耳蜗的正常功能,因为蜗外电极无法发挥作用。植入深度不足多见于耳蜗内纤维化或骨化的情况;如果耳蜗管腔缩小,电极也无法进入。常见的病因包括耳硬化症、细菌性脑膜炎、慢性中耳炎、颞骨骨折等^[15];也可由于肿瘤导致耳蜗管腔内空间不足,例如神经纤维瘤病2型^[15]。若人工耳蜗植入深度不足,术后CT检查可以发现若干电极位于圆窗或耳蜗开窗位置之外。

根据电极类型和长度的不同,第一个电极一般位于耳蜗内距离圆窗开口3~4 mm处。当圆窗开放过大或耳蜗开窗过大时,电极在植入过程中可能会过深地植入耳蜗内,导致耳蜗底圈接收的刺激不足,影响术后言语识别能力^[16]。一般认为,植入深度在1~1.5圈,超过1.5圈时考虑植入过深^[17],这种情况下并不会增加术后听觉获益,并且由于耳蜗中圈及顶圈的鼓阶直径更为狭窄,植入过深可能会造成内耳结构的损伤^[17]。利用CT影像学检查,可以明确起始电极与终末电极在耳蜗内的具体位置,判断电极是否植入过深。

(3) 评估植入损伤:耳蜗是一个中空的螺旋形骨管,骨螺旋板和基底膜将蜗螺旋管分为上、下两部分,下部分为鼓阶,上部分由前庭膜又分为前庭阶和中阶。一般认为应将人工耳蜗电极完全植入鼓阶,这样有助于减少植入创伤导致的内耳纤维化,从而减少对远期听力表现的影响^[18],有助于保留残余的内外毛细胞,从而保存残余听力^[19],有助于取得相对理想的电声刺激结果^[20]等。当原本位于鼓阶的电极移行至前庭阶时称为穿阶,穿阶会导致基底膜甚至是骨螺旋板的损伤。利用CT影像学评估及相关手段,确定电极中心相对于骨螺旋板和基底膜的位置;当位于蜗管下半部分的电极移行至上半部分时,则判定为出现了穿阶,并且可以判断穿阶出现的具体位置。相关影像学研究发现,不同电极植入的穿阶整体发生率约为20%,默认圆窗中心点为0°,穿阶多发生于植入深

角度45°~180°处^[16]。人工耳蜗植入术后残余听力保留程度与植入损伤密切相关,因此结合CT影像学评估分析植入损伤程度十分必要,有利于推动柔手术及相关新技术的进步。

2.3 评估人工耳蜗植入术后的并发症

人工耳蜗植入术后的近期并发症包括皮下血肿、切口感染、细菌性迷路炎等,远期并发症包括医源性胆脂瘤、电极缓慢移位甚至脱出等。借助CT影像学检查可以明确并发症诊断、评估病情、分析感染所在部位,包括鉴别诊断胆脂瘤或分泌性中耳炎,辅助人工耳蜗机器的故障排除,判断耳蜗设备与并发症的关系^[21]。例如电极脱出指原本正确植入耳蜗内的电极可能随着时间推移,在耳蜗内张力和内耳开口处组织移位的影响下,逐渐脱出耳蜗,轻者表现为阻抗逐渐提高,严重者可出现人工耳蜗失效;对于这种情况,结合术后不同时期的CT影像学检查,可以明确电极移位的情况和程度^[22]。

2.4 评估新技术手段的应用

随着科技的进步,不断有新设备、新技术运用于人工耳蜗领域。人工耳蜗植入术后的CT影像学分析是评价新电极稳定性、新手术技术安全性和有效性的重要评估手段。DEES等^[23]通过比较术后即时和术后3个月的CBCT影像,评价HiFocus Mid-Scala (Advanced Bionics, 美国)电极的移位情况,发现该电极在耳蜗内的位置相对稳定,随着时间产生的位移小。TAN等^[24]应用三维融合重建技术检验了国产力声特电极LCI-20PI (LISTENT, 中国)的术后电极位置,证明了新电极的可靠性。该研究发现在20例患者中全鼓阶植入的成功率为72.2%,与国际上其他类型的预弯电极有可比性(穿阶发生率为26%~51%^[18]),全鼓阶植入的病例术后1年的言语识别能力优于出现穿阶的病例。在耳科学机器人研究方面,DAOUDI等^[25]和JIA等^[26]比较了机器人辅助植入和传统植入电极的术后电极穿阶表现,证明了机器人辅助植入电极对于保存内耳精细结构的有效性,推动了耳科机器人的应用和技术进步。

2.5 辅助人工耳蜗术后调机

人工耳蜗植入后的蜗外电极需要在后续调机后关闭,因此利用术后CT影像学检查可以判断是否有蜗

外电极及具体数量,从而辅助术后调机。

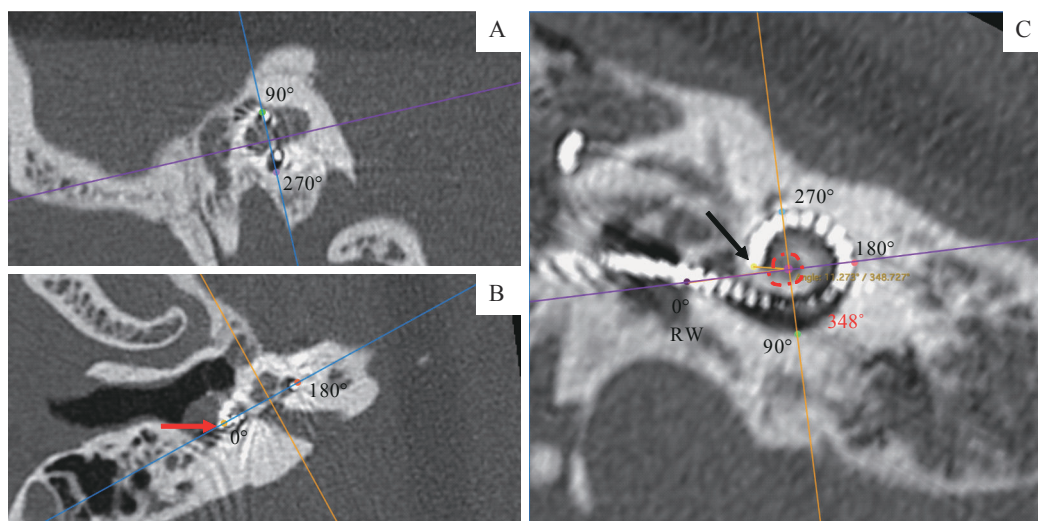
耳蜗基底膜上的螺旋器从耳蜗底部到顶部能感知的频率从高渐低,人工耳蜗电极线内的不同电极通道的刺激频率分布也与该频率拓扑分布有关,蜗底电极编码高频刺激,蜗顶电极编码低频刺激。目前在临床上,使用同一品牌植入体的患者均使用同一种默认频率编码策略。在使用人工耳蜗的患者中,由于耳蜗大小的不同,植入相同的电极后会产生不同的植入深度,导致实际电极接触的基底膜频率分布与电极默认编码频率分布产生差异^[27]。这种位置频率失匹配的现象,尤其对于语后聋患者,可能会导致人工耳蜗刺激的频率和患者根据记忆期望听到的频率出现差异,影响术后言语识别的能力^[28]。DI MARO等^[29]利用Otoplan[®](奥地利)软件分析了MED-EL(奥地利)品牌的电极植入术后的CT影像,评估了电极线整体的植入深度和每个电极的深度角,然后利用术后调机软件MAESTRO软件(MED-EL,奥地利)根据电极具体的位置重新分配电极频率编码策略,发现基于术后CT

影像学分析结果重新分配的频率编码策略,比默认编码策略能更好地提高语后聋患者言语识别能力。

3 人工耳蜗植入术后CT影像学评估方法的进展

3.1 三维重建分析电极位置、形态及植入深度

三维重建分析图像逐渐成为人工耳蜗植入术后CT影像学评估的常用手段。常见的医学影像工作站、浏览器软件中有不同的三维重建方法:①应用容积再现(volume rendering),生成人工耳蜗植入内耳的三维立体图形。②应用三维曲线重建(3D curved MPR),可以测量电极植入的深度。③应用三维多平面重建(3D multiplanar reconstruction, 3D MPR),可以从各个角度确认电极相对于耳蜗内结构的位置,即是位于鼓阶还是前庭阶,也可以测量植入深度角(图1)、距离蜗轴的距离^[30]。利用Otoplan[®]软件测量植入深度角时也是采用了3D MPR的方法^[29]。



Note: A. Sagittal view; the blue line passing the cochlear turn at 90° and 270°. B. Axial view; the blue line passing the center of round window (0°) and cochlear turn at 180°; an extra-cochlear electrode (red arrow). C. Coronal view showing the full length of the electrode array; insertion depth angle of the electrode array was 348° with the center of the axes at the center of the cochlea modiolus. Black arrow—the most apical electrode; RW—round window.

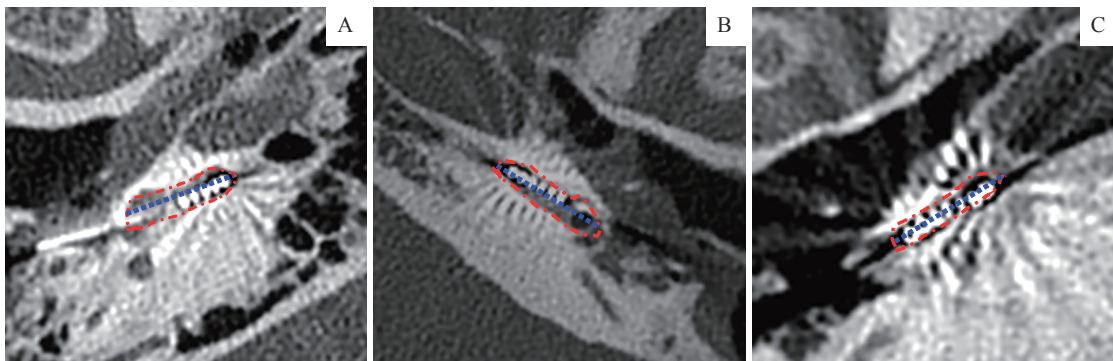
图1 利用影像浏览器中的3D MPR模式分析人工耳蜗电极植入深度角

Fig 1 Insertion depth angle determined by the 3D MPR mode in medical image viewers

但由于金属电极的伪影存在,利用3D MPR分析各个电极相对于基底膜的位置时,可能出现显示不清的问题,因此在判断有无穿阶、评估植入损伤时的准确度上仍有一定的局限性(图2)。研究^[31]发现,CBCT相比HRCT在显影电极时金属伪影较少,但即便如此,在判断末端电极相对于基底膜的位置时,相比组织学验证结果仍有失精准。

3.2 利用三维融合重建模型精确分析电极具体位置

由于术后成像中金属电极伪影的存在使得耳蜗内的结构如骨螺旋板、基底膜等难以辨认,因而将术前术后的影像结合分析是一种选择。SIPARI等^[32]和DRAGOVIC等^[33]将术后的CT成像叠加融合至术前的内耳磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI),能够进一步减少金属伪影对于分析电极位置



Note: A. Electrodes in the scala tympani. B. Electrodes in the scala vestibuli. C. Unable to determine the electrode array positioning. The red dotted lines mark the basal turns of cochlea and the blue dotted lines mark the middle of the basilar turns, *i.e.*, the basal membranes. When the electrodes were above the blue line, they were supposed to be in the scala vestibuli; when they were below the blue line, they were supposed to be in the scala tympani.

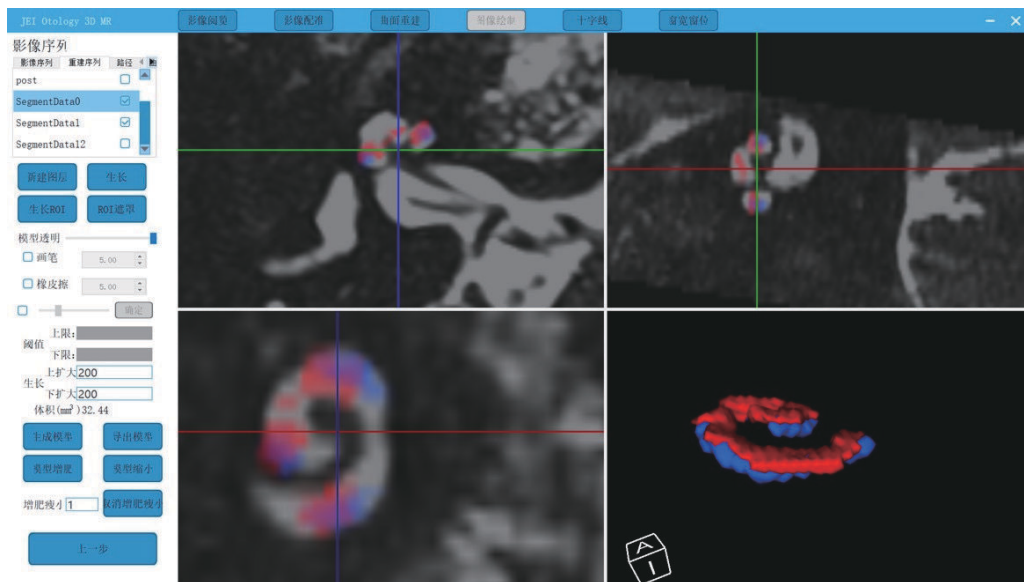
图2 影像浏览器中分析电极相对于基底膜的位置

Fig 2 Analysis of the electrode arrays positioning relative to the basilar membrane in medical image viewers

的影响。该种方法的缺点在于术前MRI成像需要确保对于耳蜗成像的质量,影像采集时间需要延长,因而在临床上普遍应用相对困难。

TORRES等^[30]提出一种结合术前和术后CT的三维融合重建技术:利用患者术前CT,根据骨螺旋板的位置估算基底膜的位置,重建出基底膜和半规管的三维模型;再利用术后CT重建出人工耳蜗电极和半规管的三维模型;以半规管的位置为参照,将2组重建模型相融合,从而分析电极相对于基底膜的位置。该团队选用了Digisonic SP EVO直电极(Oticon,法国)在人类颞骨标本上进行人工耳蜗电极植入,然后采用三维融合重建技术评估电极位置,评估结果与组织学切片结果进行对比验证;结果显示影像学技术评估电极植入穿阶造成

的基底膜断裂结果与组织学结果有良好的一致性。这意味着该三维融合重建技术通过了组织学研究验证,在判断电极从鼓阶穿阶至前庭阶时有良好的临床应用价值;但尚无研究对该方法应用于其他品牌的直电极和预弯电极的术后影像学评估开展组织学验证,且该方法对于术前CT的影像质量要求高,需要分析者经验丰富,分析过程中需要多个软件来回切换、耗时较长(一侧植入耳需要20~60 min不等),因而在临床中常规开展难度较高。上海交通大学医学院附属第九人民医院团队基于该方法于2021年开发了一套软件(专利号2021SR1001646,软著登字第7724272号),整合了原本重建电极和融合图像的不同软件,简化了分析步骤,可显著降低三维重建评估的时间(图3)^[34]。



Note: 3D model of the electrode array and basilar membrane constructed by using a reconstruction fusion software is shown in the right below part. The electrode array (in blue) was fully under the basilar membrane (in red), suggesting a complete scala tympani insertion.

图3 自创三维融合重建软件分析电极在耳蜗内的具体位置

Fig 3 Analysis of the electrode array positioning relative to the basilar membrane by the self-created 3D reconstruction fusion software

除了利用同一患者的术前影像重建基底膜外,也有团队应用已有的解剖标本生成基底膜模型,再结合具体患者的术后影像,从而分析电极位置。CAKIR等^[35]根据解剖标本的微型CT(microcomputed tomography, micro-CT)重建出7个刚性耳蜗模型(rigid cochlear model),每个模型都包括基底膜、蜗轴在内的耳蜗内精细结构,分别利用这些刚性模型分析现有的人工耳蜗植入患者的电极位置、电极植入深度,以及电极与蜗轴间的距离,比较不同模型之间分析结果的差异;结果显示应用不同的刚性模型分析实际患者的电极位置的结果存在差异性,由于不同耳蜗的大小、弯曲变化是不一样的,忽略个体之间耳蜗解剖形态的差异选择固定的刚性模型有失准确度。DEMARCY等^[36]利用算法生成非刚性的耳蜗模型(non-rigid cochlear model),即模型根据患者的实际耳蜗解剖结构进行调整,可以自动确定耳蜗内精细结构的位置,但缺点在于非常耗时,需要较高的计算机算法领域和图像处理的知识,因此没有被纳入常规临床程序中。2022年,TORRES等^[37]设计了一种新的方法,使用多个刚性基底膜模型以适应解剖学变化:测量100例实际患者的耳蜗尺寸,利用人类颞骨标本的micro-CT重建出左右各5个符合不同大小的耳蜗的刚性基底膜模版。验证过程中有5名不同资历的耳鼻喉外科医师独立利用该方法评估植入电极的位置,将评估结果与组织学切片结果对比验证;使用的电极包括Digisonic SP EVO直电极和HiFocus Mid-Scala电极。验证结果发现利用该方法评估电极位置,与组织学结果几乎一致,且不同资历的医师的评估结果相似;评估1例植入耳的平均用时为12 min。该方法只需要收集患者术后的HRCT或CBCT影像,是一种快速的、可重复的评估人工耳蜗术后电极位置的方法,重建模型清晰,已应用于临床研究来判断电极位置和

评估电极植入对于耳蜗内精细结构的损伤程度^[7]。

4 结语与展望

人工耳蜗植入术后的CT影像学评估,对于确认电极的正常植入和完整性、辅助术后的调机和可能的故障排除十分重要。CT影像学技术的出现,使得三维角度分析电极在内耳中的位置成为可能。随着技术的进步,CT影像学向着降低辐射量、减少金属伪影、提高成像质量、增加评估准确性和日常可操作性等方面发展。通过改进分析手段,有助于判断内耳精细结构的损伤程度,对于改良电极设计、改进手术技巧和推广新技术十分重要,从而推动残余听力保存,甚至为日后可能的基因治疗等打下基础,是十分值得研究、开展、推广的。期待人工耳蜗术后的CT影像学评估能在未来不断推动人工耳蜗技术和手术的进步,进一步为耳聋人群造福。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

顾文汐参与论文构思和负责论文撰写,贾欢参与论文的审阅和修改,吴皓提出构思以及参与论文的审阅和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

GU Wenxi participated in the conception and drafted the original manuscript; JIA Huan participated in the review and editing; WU Hao conceived the idea and participated in the review and editing. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

• Received: 2023-08-30

• Accepted: 2023-11-07

• Published online: 2023-12-28

参·考·文·献

- [1] O'CONNELL B P, HUNTER J B, WANNA G B. The importance of electrode location in cochlear implantation[J]. *Laryngoscope Investig Otolaryngol*, 2016, 1(6): 169-174.
- [2] XU J, XU S, COHEN L, et al. Cochlear view: postoperative radiography for cochlear implantation[J]. *Am J Otolaryngol*, 2000, 21(1): 49-56.
- [3] VERBIST B M, FRIJNS J H M, GELEIJNS J, et al. Multisection CT as a valuable tool in the postoperative assessment of cochlear implant patients[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2005, 26(2): 424-429.
- [4] RUIVO J, MERMUYS K, BACHER K, et al. Cone beam computed

tomography, a low-dose imaging technique in the postoperative assessment of cochlear implantation[J]. *Otol Neurotol*, 2009, 30(3): 299-303.

- [5] JIA H, TORRES R, NGUYEN Y, et al. Intraoperative conebeam CT for assessment of intracochlear positioning of electrode arrays in adult recipients of cochlear implants[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39(4): 768-774.
- [6] LOUBELE M, JACOBS R, MAES F, et al. Image quality vs radiation dose of four cone beam computed tomography scanners[J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2008, 37(6): 309-318.



- [7] GU W X, DAOUDI H, LAHLOU G, et al. Auditory outcomes after scala vestibuli array insertion are similar to those after scala tympani insertion 1 year after cochlear implantation[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2023. DOI: 10. 1007/s00405-023-08107-5.
- [8] DHANASINGH A, JOLLY C. Review on cochlear implant electrode array tip fold-over and scalar deviation[J]. *J Otol*, 2019, 14(3): 94-100.
- [9] PAPSIN B C. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy[J]. *Laryngoscope*, 2005, 115(S106): 1-26.
- [10] BIRMAN C S, BREW J A, GIBSON W P R, et al. CHARGE syndrome and Cochlear implantation: difficulties and outcomes in the paediatric population[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2015, 79(4): 487-492.
- [11] TODT I, RADEMACHER G, ERNST A. Identification and revision of a displaced cochlear implant electrode in the internal auditory canal[J]. *Cochlear Implants Int*, 2013, 14(4): 236-239.
- [12] PAU H, PARKER A, SANLI H, et al. Displacement of electrodes of a cochlear implant into the vestibular system: intra- and postoperative electrophysiological analyses[J]. *Acta Otolaryngol*, 2005, 125(10): 1116-1118.
- [13] GÖZEN E D, TEVETOĞLU F, YENER H M, et al. Extra-cochlear insertion in cochlear implantation: a potentially disastrous condition[J]. *J Int Adv Otol*, 2019, 15(3): 358-363.
- [14] ISHIYAMA A, RISI F, BOYD P. Potential insertion complications with cochlear implant electrodes[J]. *Cochlear Implants Int*, 2020, 21(4): 206-219.
- [15] VASHISHTH A, FULCHERI A, GUIDA M, et al. Incomplete and false tract insertions in cochlear implantation: retrospective review of surgical and auditory outcomes[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2018, 275(5): 1059-1068.
- [16] DHANASINGH A, JOLLY C. An overview of cochlear implant electrode array designs[J]. *Hear Res*, 2017, 356: 93-103.
- [17] HILLY O, SMITH L, HWANG E, et al. Depth of cochlear implant array within the cochlea and performance outcome[J]. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 2016, 125(11): 886-892.
- [18] WANNA G B, NOBLE J H, GIFFORD R H, et al. Impact of intrascalar electrode location, electrode type, and angular insertion depth on residual hearing in cochlear implant patients: preliminary results[J]. *Otol Neurotol*, 2015, 36(8): 1343-1348.
- [19] CARLSON M L, DRISCOLL C L W, GIFFORD R H, et al. Implications of minimizing trauma during conventional cochlear implantation[J]. *Otol Neurotol*, 2011, 32(6): 962-968.
- [20] IBRAHIM H N, HELBIG S, BOSSARD D, et al. Surgical trauma after sequential insertion of intracochlear catheters and electrode arrays (a histologic study)[J]. *Otol Neurotol*, 2011, 32(9): 1448-1454.
- [21] DAĞKIRAN M, TARKAN Ö, SÜRMEİLIOĞLU Ö, et al. Management of complications in 1 452 pediatric and adult cochlear implantations[J]. *Turk Arch Otorhinolaryngol*, 2020, 58(1): 16-23.
- [22] DIETZ A, WENNSTRÖM M, LEHTIMÄKI A, et al. Electrode migration after cochlear implant surgery: more common than expected?[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2016, 273(6): 1411-1418.
- [23] DEES G, SMITS J J, JANSSEN A M L, et al. A mid-scala cochlear implant electrode design achieves a stable post-surgical position in the cochlea of patients over time: a prospective observational study[J]. *Otol Neurotol*, 2018, 39(4): e231-e239.
- [24] TAN H Y, YAO J J, LI Y, et al. Radiological and audiological outcomes of the LISTENT LCI-20PI cochlear implant device[J]. *Otol Neurotol*, 2021, 42(4): 524-531.
- [25] DAOUDI H, LAHLOU G, TORRES R, et al. Robot-assisted cochlear implant electrode array insertion in adults: a comparative study with manual insertion[J]. *Otol Neurotol*, 2021, 42(4): e438-e444.
- [26] JIA H, PAN J X, GU W X, et al. Robot-assisted electrode array insertion becomes available in pediatric cochlear implant recipients: first report and an intra-individual study[J]. *Front Surg*, 2021, 8: 695728.
- [27] ALJAZEERI I, HAMED N, ABDELSAMAD Y, et al. Anatomy-based frequency allocation in cochlear implantation: the importance of cochlear coverage[J]. *Laryngoscope*, 2022, 132(11): 2224-2231.
- [28] CANFAROTTA M W, DILLON M T, BUSS E, et al. Frequency-to-place mismatch: characterizing variability and the influence on speech perception outcomes in cochlear implant recipients[J]. *Ear Hear*, 2020, 41(5): 1349-1361.
- [29] DI MARO F, CARNER M, SACCHETTO A, et al. Frequency reallocation based on cochlear place frequencies in cochlear implants: a pilot study[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2022, 279(10): 4719-4725.
- [30] TORRES R, DROUILLARD M, DE SETA D, et al. Cochlear implant insertion axis into the basal turn: a critical factor in electrode array translocation[J]. *Otol Neurotol*, 2018, 39(2): 168-176.
- [31] DE SETA D, MANCINI P, RUSSO F Y, et al. 3D curved multiplanar cone beam CT reconstruction for intracochlear position assessment of straight electrodes array. A temporal bone and clinical study[J]. *Acta Otorhinolaryngol Ital*, 2016, 36(6): 499-505.
- [32] SIPARI S, ISO-MUSTAJÄRVI M, LÖPPÖNEN H, et al. The insertion results of a mid-scala electrode assessed by MRI and CBCT image fusion[J]. *Otol Neurotol*, 2018, 39(10): e1019-e1025.
- [33] DRAGOVIC A S, STRINGER A K, CAMPBELL L, et al. Co-registration of cone beam CT and preoperative MRI for improved accuracy of electrode localization following cochlear implantation[J]. *Cochlear Implants Int*, 2018, 19(3): 147-152.
- [34] 贾欢, 谭皓月, 张治华, 等. 精准人工耳蜗电极阵列植入: 技术报告及6年回顾[C]//中华医学会. 中华医学会第十九次全国耳鼻咽喉头颈外科学学术会论文汇编. 北京: 中华医学会, 2022: 612.
- JIA H, TAN H Y, ZHANG Z H, et al. Precise cochlear electrode array insertion into the scala tympani: technical report and 6-year review[C]//Chinese Medical Association. Thesis compilation of The 19th National Academic Meeting of Chinese Society of Otolaryngology-Head and Neck Surgery. Beijing: Chinese Medical Association, 2022: 612.
- [35] CAKIR A, LABADIE R F, ZUNIGA M G, et al. Evaluation of rigid cochlear models for measuring cochlear implant electrode position[J]. *Otol Neurotol*, 2016, 37(10): 1560-1564.
- [36] DEMARCY T, VANDERSTEEN C, GUEVARA N, et al. Automated analysis of human cochlea shape variability from segmented μ CT images[J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2017, 59: 1-12.
- [37] TORRES R, TINEVEZ J Y, DAOUDI H, et al. Best fit 3D basilar membrane reconstruction to routinely assess the scalar position of the electrode array after cochlear implantation[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(8): 2075.

[本文编辑] 瞿麟平

