

## Segmentation of semicircular canals in ultra-high resolution CT and automatic measurement of morphological parameters based on artificial intelligence

YIN Wei<sup>1</sup>, LI Lantao<sup>2</sup>, ZHOU Fengfeng<sup>3</sup>, FENG Yili<sup>4</sup>, ZHANG Mengshi<sup>1</sup>, LI Xiaoguang<sup>5</sup>, YIN Hongxia<sup>4\*</sup>

(1. Department of Radiology, 4. Department of Medical Engineering, Beijing Friendship Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050, China; 2. Department of Radiology, Qingdao Central Hospital of Rehabilitation University, Qingdao 266042, China; 3. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Wannan Medical College, Wuhu 241001, China; 5. Technical College, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**[Abstract]** **Objective** To observe the value of artificial intelligence (AI) for segmenting semicircular canals in the inner ear in ultra-high resolution CT (U-HRCT) images and automatically measuring their morphological parameters. **Methods** A total of 100 subjects with normal left inner ear who underwent U-HRCT examinations were retrospectively enrolled, including 50 males and 50 females. An in-house developed AI segmentation model was used to segment the anterior, outer and posterior semicircular canals of the left ear in U-HRCT images and automatically measure the lengths, as well as the spatial angles between each two semicircular canals, and the results were compared with those obtained manually. **Results** No significant difference of the length nor angles between each two semicircular canals was found between automatic and manual measurements (all  $P > 0.05$ ). The length of semicircular canals in males obtained automatically and manually were all larger than in females (all  $P < 0.05$ ), whereas no significant difference of the angles was detected between males and females (all  $P > 0.05$ ). **Conclusion** AI could be used to efficiently and accurately segment semicircular canals in U-HRCT and automatically measure their morphological parameters. The length of semicircular canals in males were larger than in females.

**[Keywords]** semicircular canals; tomography, X-ray computed; artificial intelligence; image processing, computer-assisted; electronic data processing

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.021

## 基于人工智能分割超高分辨力 CT 中的内耳半规管并自动测量其形态学参数

尹 炜<sup>1</sup>, 李兰涛<sup>2</sup>, 周峰峰<sup>3</sup>, 冯懿俐<sup>4</sup>, 张梦诗<sup>1</sup>, 李晓光<sup>5</sup>, 尹红霞<sup>4\*</sup>

(1. 首都医科大学附属北京友谊医院放射科, 4. 工程处, 北京 100050; 2. 康复大学青岛中心医院放射科, 山东 青岛 266042; 3. 皖南医学院第一附属医院放射科, 安徽 芜湖 241001; 5. 北京工业大学信息技术学院, 北京 100124)

**[摘要]** **目的** 观察人工智能(AI)用于分割超高分辨力 CT(U-HRCT)图像中的内耳半规管并自动测量其形态学参数的价值。**方法** 回顾性收集 100 名(男、女各半)接受 U-HRCT 检查且左侧内耳结构正常的受试者, 采用自主研发的 AI 模型分割并自动测量左耳前、外、后半规管长度及其两两之间的夹角, 并与人工手动测量结果进行对比。**结果** 各半规管长度及其间夹角的自动测值与手动测值差异均无统计学意义( $P$  均  $> 0.05$ )。男性各半规管长度的自动与手动测值均大

**[基金项目]** 北京市科技计划(Z241100009024020)、国家自然科学基金(62371316)、北京市自然科学基金(7252281)。

**[第一作者]** 尹炜(1988—), 男, 北京人, 硕士, 主管技师。研究方向: 医学影像技术。E-mail: yinwei1234@126.com

**[通信作者]** 尹红霞, 首都医科大学附属北京友谊医院工程处, 100050。E-mail: 282496774@qq.com

**[收稿日期]** 2025-08-19 **[修回日期]** 2025-12-11

于女性( $P$ 均 $<0.05$ ),而不同性别之间左耳半规管间夹角差异均无统计学意义( $P$ 均 $>0.05$ )。结论 基于 AI 能高效、准确地分割 U-HRCT 中的半规管并自动测其形态学参数;男性半规管长度大于女性。

[关键词] 半规管; 体层摄影术, X 线计算机; 人工智能; 图像处理, 计算机辅助; 电子数据处理

[中图分类号] R322.923; R814.42 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2026)03-0425-04

半规管是内耳的重要组成部分,具有独特的空间三维(three dimension, 3D)关系及几何形态。前、外、后半规管几何形态及其间夹角异常可致阵发性位置性眩晕、突发性耳聋及梅尼埃病等耳源性疾病<sup>[1]</sup>;精确定量评估半规管形态是深入理解其生理功能、诊断相关疾病及规划耳神经外科手术的重要解剖学基础。传统半规管形态学研究主要依赖测量离体标本或基于临床 CT 影像进行手工测量<sup>[2-3]</sup>,无法反映活体生理状态,且手工测量耗时、费力,难以满足大规模临床研究及精准个体化医疗的需求。超高分辨力 CT(ultra-high resolution CT, U-HRCT)为清晰显示内耳迷路等结构提供了可能;人工智能(artificial intelligence, AI)技术的飞速发展为自动化、高精度地提取与量化分析解剖结构开辟了新途径。本研究观察基于 AI 分割 U-HRCT 中的内耳半规管并自动测量其长度及其间夹角等核心形态学参数的价值。

### 1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性纳入 2021 年 8 月—2023 年 10 月于首都医科大学附属北京友谊医院接受耳部 U-HRCT 检查的 100 名受试者,男、女各 50 名,年龄 18~70 岁、平均(45.2±7.6)岁。纳入标准:①U-HRCT 数据完整;

②内耳解剖结构正常;③年龄 $\geq 18$ 岁。排除标准:①耳部金属植入物;②图像质量不佳。本研究经医院伦理委员会审查(2024-P2-209)批准同意;检查前受试者均知情同意。

1.2 仪器与方法 采用 Ultra 3D U-HRCT 机(北京朗视仪器股份有限公司)、利用高清成像系

统采集 U-HRCT 图像。嘱受试者仰卧、头先进,身体稍向右侧偏移,使左耳靠近检查床中心线,以小视野高清模式进行扫描,范围包括岩锥弓上隆至茎乳孔;具体参数见表 1。

表 1 左耳 U-HRCT 扫描参数

参数	数值
管电压	100~110 kV
管电流	120~180 mA
层厚	0.1 mm
层间隔	0.1 mm
扫描体素	0.05 mm×0.05 mm×0.05 mm
重建体素	0.1 mm×0.1 mm×0.1 mm
重建视野	65 mm×65 mm

### 1.3 处理图像

1.3.1 AI 分割半规管并自动测量其参数 采用渐进式两阶段分割框架从 3D U-HRCT 容积数据中自动提取内耳半规管骨架结构,再以深度神经网络模型精准分割前、后及外半规管。

以基于 Transformer 架构的 TransUNet 网络模型<sup>[4]</sup>作为主干(图 1)完成分割任务。U-HRCT 数据量大,故采用二维(two dimension, 2D)分层分割策略。于 ResNetV2 中封装编码器模块,利用 3 个 block 与解

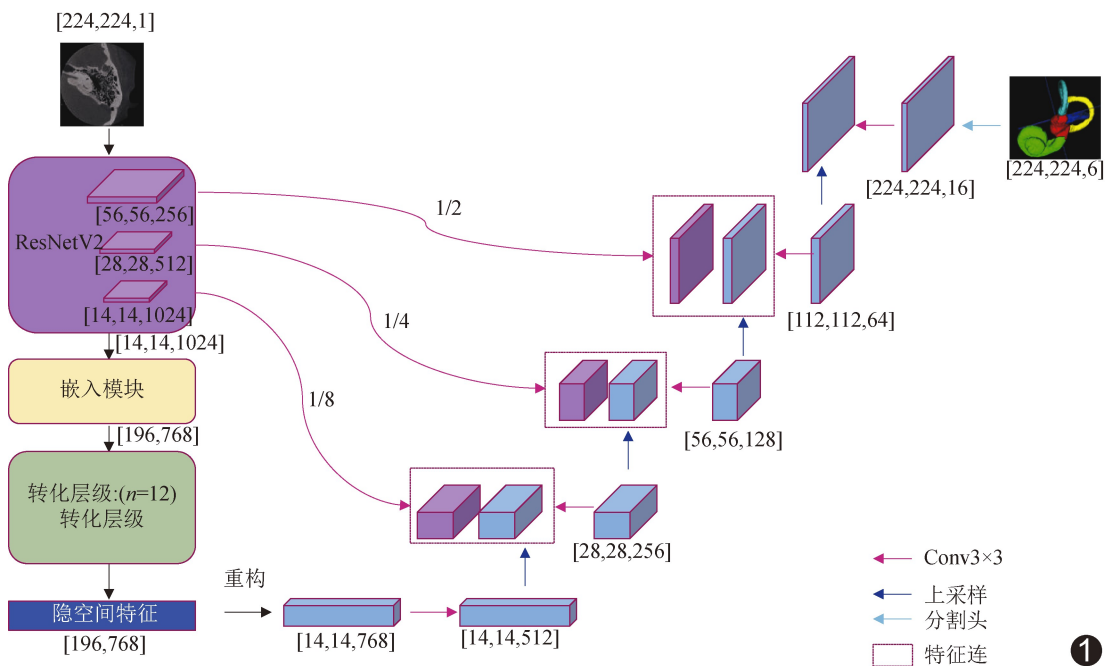


图 1 TransUNet 分割算法网络

码器对应部分进行跳跃连接以整合多尺度信息,并通过卷积以防止过拟合筛选等操作,将输出向量送入转化模块,以提取全局上下文特征;重复进行 12 次上述过程后,解码器将图像采样至原始输入尺寸,完成对内耳迷路 3 个半规管的像素级分割。

完成分割后,基于标准图像处理算法自动定量提取形态学参数(图 2):①提取分割后各半规管 3D 模型的中心线;②沿中心线计算各半规管长度;③基于分割结果拟合各半规管所在空间平面;④计算任意 2 个半规管所在平面之间的夹角,即其空间夹角。

1.3.2 人工手动分割与测量 由 1 名具有 10 年以上经验的影像科技师于 GE AW 4.7 后处理工作站进行人工测量。首先对原始数据进行轴位、冠状位及矢状位 3D 重建,之后利用多平面重建技术(multi-planar reconstruction, MPR),将参考线交点置于轴位图像中的外半规管的最外侧点,并调整定位线使其在冠状位及矢状位上均与外半规管长轴平行,由此获得标准化正交视图(图 3)并于其中手动测量各半规管长度及其两两之间夹角;重复测量 3 次,取平均值作为最终结果。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 19.0 及 GraphPad Prism 5 软件进行统计分析和数据图形化处理。以  $\bar{x} \pm s$  表示符合正态分布且满足方差齐性的计量资料,采用配对样本 *t* 检验比较手工与自动化测值,以独立样本 *t* 检验进行性别间比较;对不符合正态分布或不满足方差齐性的数据采用非参数检验进行比较。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 测量方法比较 各半规管长度及其间夹角的自动测值与手工测值差异均无统计学意义( $P$  均  $> 0.05$ )。见表 2。

### 2.2 不同性别测值比较

2.2.1 自动测值 自动测量所获男性 3 个半规管长度均大于女性( $P$  均  $< 0.05$ );男、女性间各半规管夹角差异均无统计学意义( $P$  均  $> 0.05$ )。见表 3。

2.2.2 手工测值 手工测量所获男性 3 个半规管长度亦均大于女性( $P$  均  $< 0.05$ );男、女性间各半规管之间两两夹角差异均无统计学意义( $P$  均  $> 0.05$ )。见表 4。

## 3 讨论

半规管为内耳前庭系统的核心结构,其形态和空间排列直接影响人体平衡功能<sup>[5]</sup>。定量评估半规管的传统方法依赖手动分割后进行测量,其过程包括采集影像、逐层分割、3D 重建及将分割结果重建为 3D 模型并进行测量分析,效率低、主观性强<sup>[6]</sup>且可重复性差<sup>[7-8]</sup>,难以应对大规模临床数据分析需求,但灵活性强,适合分析小规模数据或复杂病例。AI 分割模型优势突出,不仅效率及一致性高,并具有良好可扩展性<sup>[9]</sup>,适用于大规模数据或常规病例。目前 AI 技术已用于智能分割半规管<sup>[10-11]</sup>,尤其 U-HRCT 与 AI 分割技术的结合为自动、量化研究半规管 3D 形态提供了新思路<sup>[12]</sup>。本研究基于 AI 于 U-HRCT 中分割各半规管并自动测量其参数结果与手工测值高度一致。

本研究结果显示,各半规管长度及其间夹角的自动测值与手工测值差异均无统计学意义( $P$  均  $> 0.05$ ),表明 AI 分割与自动测量算法相结合可使测量精度媲美经验丰富的技师;且无论是自动测量还是手工测量,男性 3 个半规管的长度均大于女性( $P$  均  $< 0.05$ ),与既往 MRI 研究结果相符<sup>[13]</sup>,而不同性别间各半规管空间夹角均未见显著差异( $P$  均  $> 0.05$ ),与 HUANG 等<sup>[14]</sup>的报道一致。上述结果

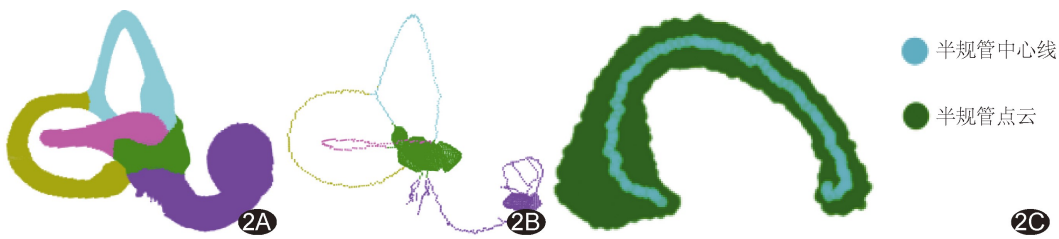


图 2 提取半规管形态学参数 A. 分割半规管; B. 提取中心线; C. 平面拟合

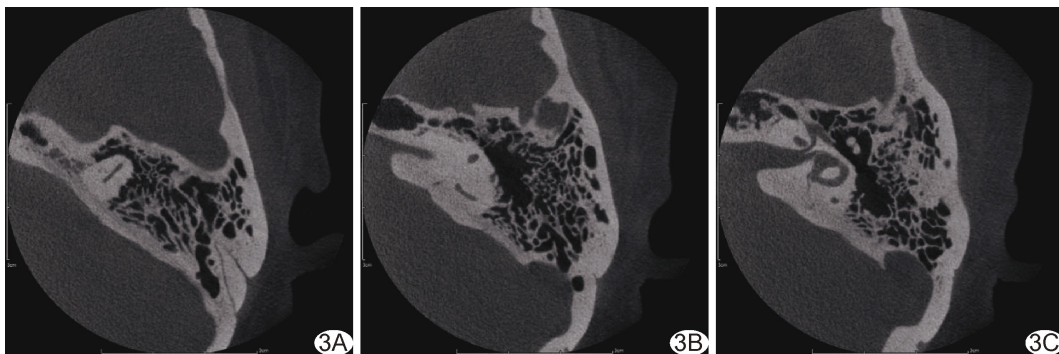


图 3 患者女,31 岁,偶发眩晕并伴有听力下降半年余 U-HRCT 图示前(A)、后(B)及外半规管(C)

表 2 自动测量与手工测量各半规管长度及其间夹角比较

测量方法	前半规管长度(mm)	后半规管长度(mm)	外半规管长度(mm)	前/外半规管夹角(°)	前/后半规管夹角(°)	外/后半规管夹角(°)
自动测量	17.992±2.033	20.636±2.452	14.462±0.853	85.346±1.932	95.522±3.791	92.275±3.490
手工测量	18.174±2.966	20.773±3.808	14.565±1.600	85.730±5.325	95.396±6.490	91.933±6.808
t 值	-1.408	-0.688	-1.271	-1.107	0.255	0.929
P 值	0.162	0.493	0.207	0.271	0.800	0.355

表 3 男、女性各半规管长度及其间夹角自动测值比较

性别	前半规管长度(mm)	后半规管长度(mm)	外半规管长度(mm)	前/外半规管夹角(°)	前/后半规管夹角(°)	外/后半规管夹角(°)
男性(n=50)	19.166±1.807	22.075±2.123	14.764±0.849	85.663±2.051	95.822±3.550	92.383±3.487
女性(n=50)	16.827±1.529	19.200±1.878	14.165±0.744	85.026±1.762	95.225±4.024	92.166±3.534
t 值	6.997	7.167	3.845	1.676	0.790	0.323
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	0.097	0.432	0.747

表 4 男、女性各半规管长度及其间夹角手工测值比较

性别	前半规管长度(mm)	后半规管长度(mm)	外半规管长度(mm)	前/外半规管夹角(°)	前/后半规管夹角(°)	外/后半规管夹角(°)
男性(n=50)	19.175±3.343	22.672±3.780	14.901±1.749	85.882±4.727	95.735±6.776	92.614±6.625
女性(n=50)	17.198±2.153	18.873±2.759	14.230±1.372	85.581±5.906	95.059±6.252	91.260±6.987
t 值	3.461	5.747	2.138	0.279	0.522	0.989
P 值	0.001	<0.001	0.035	0.781	0.603	0.325

提示,相比长度,半规管的空间架构可能是其更为稳定的解剖学特征,后者的稳定性对于维持基本前庭功能坐标系具有重要意义。

综上,基于 AI 能高效、准确地分割 U-HRCT 中的半规管并自动测量其形态学参数;男性半规管长度大于女性。本研究的主要局限性在于为单中心、回顾性分析,样本量较小,且仅基于单一 U-HRCT 设备,有待进一步探索 AI 分割与自动测量的泛化能力。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:尹炜研究设计、撰写文章;李兰涛和周峰研究实施;冯懿俐修改文章、查阅文献;张梦诗查阅文献;李晓光数据和图像分析;尹红霞指导、审阅文章。

[参考文献]

[1] 谷李欣,马孝宝,金玉莲,等. 病程对水平半规管良性阵发性位置性眩晕复位后残余症状的影响[J]. 中华耳科学杂志, 2024, 22(2):207-210.

[2] 宋跃帅,龚树生. 以岩乳管定位上半规管的影像学研究[J]. 医学影像学杂志, 2022, 32(12):2163-2166.

[3] ZHOU M, MAO J, LI X, et al. Intelligent analysis and measurement of semicircular canal spatial attitude [J]. Front Neurol, 2024, 15:1396513.

[4] CHEN J, LU Y, YU Q, et al. TransUNet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation [J/OL]. (2021-02-08)[2025-08-18]. <https://arxiv.org/pdf/2102.04306>.

[5] YANG H H, MBALLO C, YANG I, et al. Near and frank dehiscence of the superior semicircular canal: A comparative analysis of clinical outcome[J]. J Neurosurg, 2025, 143(2):550-559.

[6] GUO P, QIN F, YE L, et al. The role of audiological features and horizontal semicircular canal function at various frequencies in vestibular migraine and Menière's disease[J]. Acta Otolaryngol, 2025, 145(2):115-122.

[7] INUI H, KITAHARA T, ITO T, et al. Magnetic resonance 3D measurement of the endolymphatic space in 100 control human subjects[J]. J Int Adv Otol, 2021, 17(6):536-540.

[8] BOUBAKER F, ELIEZER M, POILLON G, et al. Ultra-high-resolution CT of the temporal bone: Technical aspects, current applications and future directions [J]. Diagn Interv Imaging, 2025, 106(6):205-216.

[9] MONEIR W, DARWISH A Y, KHAFAGY Y W, et al. Superior semicircular canal dehiscence: A radiological and clinical study [J]. Indian J Otolaryngol Head Neck Surg, 2024, 76(1):865-870.

[10] WU S, LIN P, ZHENG Y, et al. Measurement of human semicircular canal spatial attitude[J]. Front Neurol, 2021, 12:741948.

[11] SONODA Y, FUJISAWA S, KUROKAWA M, et al. Comparison of publicly available artificial intelligence models for pancreatic segmentation on T1-weighted Dixon images[J]. Jpn J Radiol, 2025, 43(10):1663-1669.

[12] GILLET R, ELIEZER M, HOSSU G, et al. Measurement of stapes footplate thickness using ultra-high-resolution computed tomography: Stapes axial plane correlates better with otosclerosis than lateral semicircular canal plane [J]. Acta Otolaryngol, 2024, 144(3):219-225.

[13] 李书玲,刘怀军,池琛,等. 正常人内耳前庭、半规管及耳蜗的 MRI 测量[J]. 中华放射学杂志, 2003, 37(1):55-58.

[14] HUANG Y, LIU K, TANG R, et al. Spatial position changes in the semicircular canals may be the anatomical basis of Meniere's disease: A preliminary study based on ultra-high-resolution computed tomography (CT) and intelligent segmentation [J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(8):6060-6071.