

CT and MR angiography image fusion for evaluating relationships of vascular, nerve and bony structures of trigeminal nerve root entry zone in patients with primary trigeminal neuralgia

XU Jia^{1,2}, JI Dafeng¹, LYU Guangming^{1*}

(1. Medical School, Nantong University, Nantong 226001, China; 2. Department of Neurosurgery, the Second Peoples Hospital of Wuxi, Wuxi 214000, China)

[Abstract] **Objective** To explore the value of dual-mode image fusion based on CT and MR angiography (MRA) for evaluating relationships of vascular, nerve and bony structures of the trigeminal nerve root entry zone (REZ) in patient with primary trigeminal neuralgia (PTN). **Methods** Data of head CT and MRA of 10 PTN patients were retrospectively analyzed. After 3D visualization, 9 anatomical markers were selected based on CT and MRA respectively for registration, among which 5 were taken as fusion markers for image fusion according to the Euclidean distance of the markers. The fiducial registration error (FRE) of fusion markers were calculated to evaluate the accuracy of image fusion. The artery and nervous models were reconstructed based on MRA, and the spatial relationship of vessels and trigeminal nerve roots of REZ were observed to judge the responsible vessel of PTN. The distance between responsible vessels and trigeminal nerve roots, trigeminal nerve traces and foramen ovale were measured and compared between the involved side and the opposite side. **Results** The accuracy of image fusion was good in all 10 patients, and FRE of fusion markers was 1.862–3.156 mm. The superior cerebellar artery was the responsible vessel of PTN in all 10 cases. The distance between superior cerebellar artery and trigeminal nerve impression ($[0.531 \pm 0.153]$ mm) and foramen ovale ($[20.955 \pm 1.147]$ mm) in the involved side were shorter than those in the opposite side ($[2.573 \pm 1.050]$ mm, $[24.864 \pm 1.807]$ mm, both $P < 0.001$), while no significant difference of the distances was found between superior cerebellar artery and trigeminal nerve root in the involved side ($[5.024 \pm 1.063]$ mm) and the opposite side ($[5.971 \pm 1.292]$ mm, $P = 0.081$). **Conclusion** CT and MRA image fusion was helpful for quantitative analysis of relationships of blood vessels, bone structures and trigeminal nerve root in REZ of PTN patients.

[Keywords] trigeminal neuralgia; tomography, X-ray computed; magnetic resonance imaging; image fusion

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2022.07.007

CT 及 MR 血管造影图像融合评估原发性三叉神经痛患者三叉神经入脑干区血管、神经及骨性结构的关系

徐 嘉^{1,2}, 季达峰¹, 吕广明^{1*}

(1. 南通大学医学院, 江苏 南通 226001; 2. 无锡市第二人民医院神经外科, 江苏 无锡 214000)

[摘要] **目的** 观察 CT 及 MR 血管造影(MRA)双模态图像融合评估原发性三叉神经痛(PTN)患者三叉神经入脑干区(REZ)血管、神经及骨性结构的关系的价值。**方法** 回顾性分析 10 例 PTN 患者头部 CT 及 MRA, 将数据三维可视化后, 分别于 CT 与 MRA 图中选取 9 个解剖标记点进行配准, 根据配准后标记点的欧氏距离选出 5 个融合标记点用于图像

[第一作者] 徐嘉(1981—), 男, 江苏无锡人, 本科, 主治医师。研究方向: 神经系统疾病的外科治疗。E-mail: 21869763@qq.com

[通信作者] 吕广明, 南通大学医学院, 226001。E-mail: gmlu@ntu.edu.cn

[收稿日期] 2021-08-20 **[修回日期]** 2022-02-07

融合;计算融合标记点的配准误差(FRE),评估图像融合精度。基于 MRA 数据重建脑底动脉及神经模型,观察 REZ 处血管与三叉神经根的空间位置关系,判定 PTN 责任血管;测量并比较患侧与对侧责任血管与三叉神经根、三叉神经压迹及卵圆孔之间距离的差异。**结果** 10 例图像融合精度均良好,标记点 FRE 为 1.862~3.156 mm,PTN 责任血管均为小脑上动脉。患侧小脑上动脉与三叉神经压迹距离[(0.531±0.153)mm]及与卵圆孔的距离[(20.955±1.147)mm]均小于对侧[(2.573±1.050)mm、(24.864±1.807)mm, P 均<0.001],与三叉神经根的距离[(5.024±1.063)mm]与对侧差异无统计学意义[(5.971±1.292)mm, P=0.081]。**结论** CT 及 MRA 图像融合有助于定量观察 PTN 患者 REZ 血管与骨性结构及三叉神经根的毗邻关系。

[关键词] 三叉神经痛; 体层摄影术, X 线计算机; 磁共振成像; 图像融合

[中图分类号] R745.1; R814.42 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2022)07-0995-05

原发性三叉神经痛(primary trigeminal neuralgia, PTN)发病率约 5/100 000,患者多为中老年人,一般单侧(右侧居多)发病,主要累及眼睑下至口角(上颌支)或口角至颈上部(下颌支)^[1-2];目前认为其发病机制主要为神经微血管压迫(neuro-vascular compression, NVC)导致三叉神经脱髓鞘。常规 MR 于患侧与对侧三叉神经根入脑干区(root entry zone, REZ)检出 NVC 的比值为 16.7,在 REZ 之外则无显著差异^[3]。本研究观察 CT 及 MRA 双模态图像融合评估 PTN 患者 REZ 区血管、神经及骨性结构的关系的价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集 2020 年 10 月—2021 年 10 月于无锡市第二人民医院就诊的 10 例接受头部 CT 及 MR 扫描的 PTN 患者,男 3 例,女 7 例,年龄 49~75 岁,中位年龄 61 岁;均为单侧发病,6 例右侧、4 例左侧;轻触上、下唇及鼻翼等部位可激发疼痛,且 MRA 诊断三叉神经根受压。

1.2 仪器与方法

1.2.1 CT 以 Toshiba Aquilion ONE 320 排 CT 机采集头部图像,管电压 120 kV,管电流 100 mAs,层厚 4 mm,层间距 1 mm,分辨率 0.468 0 mm×0.468 0 mm×4 mm。

1.2.2 MR 以 Siemens MAGNETOM Skyra 3.0T MR 仪行头部 MRA,采用三维时间飞跃序列行轴位扫描,TR 21 ms,TE 3.43 ms,飞跃角 18°,层厚 0.7 mm,层间距 1 mm,分辨率 0.390 6 mm×0.390 6 mm×0.7 mm。

1.3 图像预处理 将原始数据导入 3D Slicer 软件(Version 4.11.20210226, http://www.slicer.org),基于 Raycasting Rendering 对 CT 及 MRA 数据进行渲染,调整渲染阈值(-720),以显示皮肤结构,并行断层重采样。

1.4 图像融合

1.4.1 选取解剖特征点及融合标记点 根据 CT 及

MRA 图像中皮肤渲染及断层重采样结果,按以下原则选取体表及颅内均可明确定位的解剖特征点作为体表配准标记及内部配准标记,即解剖标记点:①CT 及 MRA 图中均可明确定位,且定位范围<4 mm²;②避开耳廓、枕部皮肤、面颊等易变形区域;③具有对称性或中轴性且不可共面。共选出左耳轮起始后缘、右耳轮起始后缘、左内眦、右内眦、枕内隆凸与小脑幕起始处交界点、菱形窝背盖部顶、左侧脑室前角、右侧脑室前角及蝶鞍背顶端 9 个解剖标记点,依次标记为 F1~F9。见图 1。

计算各解剖标记点配准后的欧氏距离,据以筛选并每例保留融合标记点;以融合标记点的配准误差(fiducial registration error, FRE)评估图像整体 FRE,即图像融合精度。以奇异值分解(singular value decomposition, SVD)算法(公式 1~6)得出图像融合的变换矩阵,以公式 7 计算 FRE。将融合标记点筛选标准设定为 E_i(即 i 个解剖标记点配准后的欧氏距离)<5 mm,图像融合标准为 FRE<5 mm。

$$d_{CT} = F_{CT} - F_{CTc} \quad d_{MRI} = F_{MRA} - F_{MRAc} \quad (1)$$

$$H = d_{CT} * d_{MRA}^T \quad (2)$$

$$[U, S, V] = svd(H) \quad (3)$$

$$R = U * V^T \quad (4)$$

$$T = F_{CT} - R * F_{MRA} \quad (5)$$

$$E_i = F_{CT} - F_{MRAi} (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (6)$$

$$FRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (7)$$

其中, d 为标记点与几何中心的距离向量, F_{CT} 是 CT 标记点坐标, F_{CTc} 是 F_{CT} 的几何中心坐标, F_{MRA} 指 MRA 标记点坐标, F_{MRAc} 是 F_{MRA} 的几何中心坐标, H 为 2 个标记点集的线性积分, R 是旋转矩阵, T 为位移矩阵, F_{MRAi} 指 MRA 转换后标记点的坐标。

1.4.2 可视化图像融合 采用以融合标记点获得的旋转/位移矩阵对 CT 及 MRA 图像进行融合,以 CT 为固定图像、MRA 为移动图像,图像叠加透明值为 0.5,

重建矢状位及冠状位融合图像, 见图 2。

1.5 重建血管及神经 融合图像后, 基于移动后的 MRA 手动分割并重建三叉神经根、下颌神经及大脑底部血管, 获得神经及动脉模型。于矢状位图像中定位并手动描绘下颌神经; 于大脑底部 REZ 进行血管分割与重建, 向上扩展至双侧侧脑室前角水平、向下扩展至椎动脉入脑部。之后定位并观察小脑上动脉在 REZ 中的走行, 对血管分割结果进行适当调整, 完整重建小脑上动脉。

1.6 叠加显示重建结构与 CT 图像可视化 将位移后的 MRA、神经和动脉模型及 CT 图像导入 3D Slicer 软件, 对 CT 图像再次进行渲染, 得到颅骨渲染效果。将重建的动脉模型、三叉神经根及下颌神经与颅骨叠加, 根据下颌神经与卵圆孔的位置对融合位移量进行微调, 以下颌神经进入卵圆孔为准。

1.7 测量距离 将神经及动脉投影显示于 CT 与 MRA 断层图像中, 观察 REZ 处血管与三叉神经根的空间关系, 判断 PTN 责任血管。见图 3。

完成图像融合后, 定位三叉

神经根与责任血管最接近处, 于局部左、右侧相应血管下缘放置标尺起点、于三叉神经根上缘放置标尺终点, 软件自动计算二者之间的距离(图 4A)。渲染 CT 数据后, 分别于左、右侧相应血管下缘与三叉神经压迹上缘及卵圆孔放置标尺, 测量其距离(图 4B)。

1.8 统计学分析 采用 Matlab(2016Ra)统计分析软件。以 Jarque-Bear 检验对计量资料进行正态性分析, 符合者以 $\bar{x} \pm s$ 表示。以配对 *t* 检验比较患侧与对侧相应血管相关参数。 $P < 0.01$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像融合精度 10 例图像融合所用融合标记点有所不同, 而图像融合精度均良好, FRE 为 1.862~3.156 mm, 见表 1 及图 5。

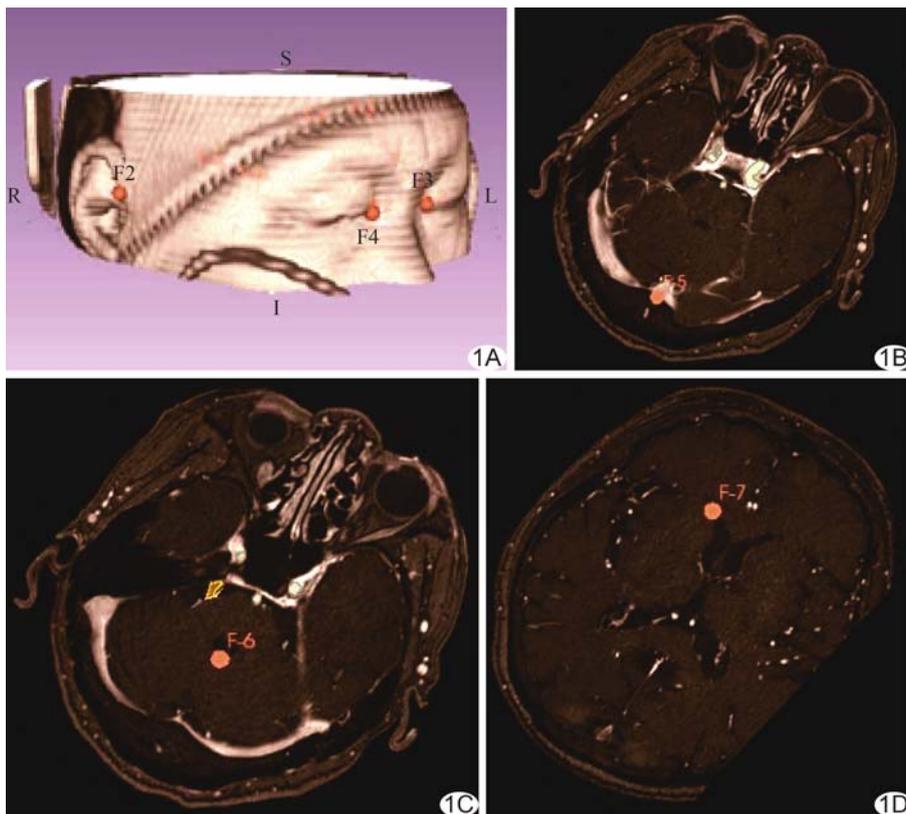


图 1 基于头部 MRA 选取解剖标记点示意图 A. 渲染图示体表标记点 F2~F4; B~C. 不同层面断层重建图像示解剖标记点 F5、F6、F7

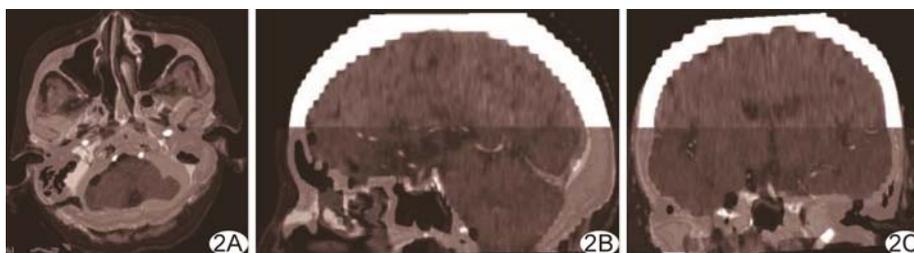


图 2 基于融合标记点融合头部 CT/MRA 图像 A. 轴位; B. 矢状位; C. 冠状位

2.2 责任血管与对侧相应血管相关参数比较 10 例 PTN 责任血管均为小脑上动脉。患侧小脑上动脉与三叉神经压迹 $[(0.531 \pm 0.153) \text{ mm}]$ 及卵圆孔距离 $[(20.955 \pm 1.147) \text{ mm}]$ 均小于对侧 $[(2.573 \pm 1.050) \text{ mm}、(24.864 \pm 1.807) \text{ mm}]$, P 均 < 0.001 , 而与三叉神经根的距离 $[(5.024 \pm 1.063) \text{ mm}]$ 与对侧差异无统计学意义 $[(5.971 \pm 1.292) \text{ mm}, P = 0.081]$ 。

3 讨论

MRA 是诊断 PTN、术前定位及术后评估的重要手段^[3-5]。PTN 责任血管以小脑上动脉居多, 占比达 48.5%, 此外还有小脑上动脉+岩静脉、岩静脉等^[3]。三维时间飞跃序列对判断 PTN 责任血管具有重要意义^[4,6]。MRA 用于脑神经成像具有独特优势^[7-8], 利用

弥散张量成像的表观弥散系数可进一步评估脑神经走行及受压情况^[9]。导航微创手术高度依赖 CT 数据,明确三叉神经根、下颌神经与卵圆孔的关系是射频消融治疗 PTN 术前规划的重要依据^[10]。通过融合 CT 与 MRA 图像可为评估相关结构提供更多信息。

融合常规 CT 与 MRA 对显示头部骨性结构及软组织具有重要价值^[11]。基于互信息^[12]算法是融合医学图像的常用手段,但要求 2 种图像中组织结构初始位置较为接近。基于点配准图像融合更为快捷便利,精度可控性也较高^[13]。影像学检查 PTN 时,扫描范围多限于颅顶至鼻中部,可用解剖特征点有限。本研究利用解剖标记点^[13]配准融合 CT 与 MRA 图像,以 SVD 法计算解剖标记点配准后的欧氏距离筛选融合标记点,通过计算融合标记点的 FRE 评估图像融合精度,所获融合图像视觉效果良好,个体 FRE 为 1.862~3.156 mm,表明融合误差较小,可精确重现责任血管与骨性结构的关系。

既往将 PTN 责任血管压迫神经分为 3 类:①分离,三叉神经根与血管之间存在一定距离,不直接接触;

②接触,三叉神经根与血管相贴,但无压迫痕迹;③压迫,血管压迫三叉神经根使之变形。本研究重建神经、动脉模型并将其投影显示于 CT 与 MRA 断层图像

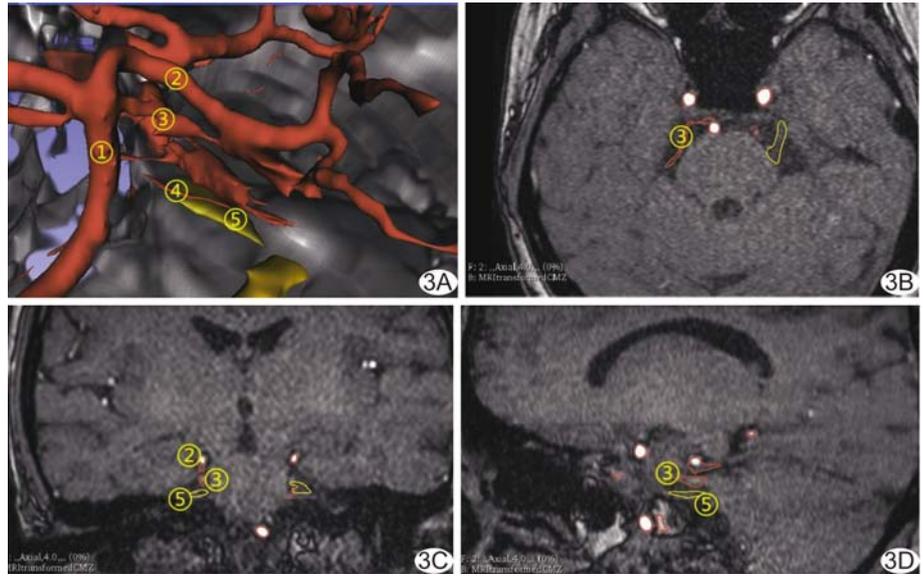


图 3 REZ 处血管与三叉神经根的空间关系 A. 动脉、神经模型定位图; B~D. 各血管在头部轴位(B)、冠状位(C)及矢状位(D)MRA 断层图像中的投影 注:①基底动脉;②右侧大脑后动脉;③右侧小脑上动脉;④右侧小脑上动脉下支;⑤右三叉神经根



图 4 测量责任血管(小脑上动脉,红色)下缘与三叉神经根(黄色)上缘(A)及三叉神经压迹上缘之间(B)距离的示意图

表 1 10 例 PTN 一般资料及头部(REZ)CT/MRA 融合图像相关数据

患者序号	性别	年龄(岁)	症状侧别	FRE (mm)	融合标记点	症状侧小脑上动脉至三叉神经压迹距离 (mm)	非症状侧小脑上动脉至三叉神经压迹距离 (mm)	症状侧小脑上动脉至三叉神经根距离 (mm)	非症状侧小脑上动脉至三叉神经根距离 (mm)	症状侧小脑上动脉至卵圆孔距离 (mm)	非症状侧小脑上动脉至卵圆孔距离 (mm)
1	女	50	右	2.144	F1、F2、F3、F5、F9	0.267	3.841	3.514	8.483	21.962	23.619
2	女	65	右	3.156	F1、F2、F4、F7、F9	0.611	1.381	6.199	7.144	20.743	27.335
3	女	57	右	2.782	F1、F2、F4、F6、F9	0.683	2.865	4.312	5.938	21.585	24.685
4	女	76	左	2.561	F1、F2、F5、F7、F9	0.491	3.358	5.973	6.941	19.453	23.713
5	男	58	右	1.862	F1、F2、F3、F8、F9	0.671	3.999	3.282	6.511	21.548	27.295
6	女	64	右	2.098	F1、F2、F4、F6、F9	0.278	3.432	5.882	4.522	19.392	27.276
7	女	77	左	1.955	F1、F2、F4、F5、F9	0.477	2.276	4.518	5.496	20.583	24.357
8	女	54	右	1.878	F1、F3、F4、F7、F9	0.643	1.375	5.946	4.997	21.552	22.364
9	男	72	右	2.148	F1、F2、F3、F5、F9	0.569	1.641	5.135	4.466	22.863	23.434
10	男	64	右	3.045	F1、F2、F3、F5、F9	0.621	1.564	5.482	5.215	19.864	24.559

中,以观察 REZ 血管与三叉神经根的空间关系,进而判定 PTN 责任血管,结果显示 10 例 PTN 责任血管均为小脑上动脉;通过比较患侧与对侧责任血管与三叉神经根的距离,推测患侧是否存在压迫现象,在不能完全重建神经时,可量化评价责任血管压迫程度,弥补既往分类的不足。

三叉神经压迹所在岩部是 MVD 术前评估的重要结构^[14]。本研究提出了一个新的测量方法,用于量化责任血管与三叉神经压迹之间的距离。卵圆孔位于三叉神经根前方。本研究结果显示,PTN 患侧小脑上动脉与三叉神经压迹及卵圆孔的距离均小于对侧,即责任血管在一定程度上发生了向前屈曲和变形。本研究中,小脑上动脉与三叉神经根的距离在患侧与对侧差异无统计学意义,原因可能在于样本量较少,且 MRA 采集层厚较厚,导致显示神经根不全及测量误差,有待优化 MRA 数据、收集更多病例后进一步分析。

综上,CT 及 MRA 图像融合有助于定量评估 PTN 患者 REZ 处血管、骨性结构及三叉神经根的毗邻关系。

[参考文献]

- [1] 刘德财. 神经血管关系对原发性三叉神经痛诊断价值的 Meta 分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2018: 1-51.
- [2] MUELLER D, OBERMANN M, YOON M S, et al. Prevalence of trigeminal neuralgia and persistent idiopathic facial pain: A population-based study [J]. *Cephalalgia*, 2011, 31 (15): 1542-1548.
- [3] ZHOU Q, LIU Z L, QU C C, et al. Preoperative demonstration of neurovascular relationship in trigeminal neuralgia by using 3D FIESTA sequence [J]. *Magn Reson Imaging*, 2012, 30 (15): 666-671.
- [4] 胡兴荣, 邱妮妮, 向海波, 等. 磁共振断层血管成像对颅神经血管压迫综合症的诊断价值[J]. *华南国防医学杂志*, 2017, 31(12): 799-802.
- [5] 胡兴荣, 贵丹, 陈军, 等. 3D-CE-TOF-SPGR 对静脉性颅神经血管压迫综合症的应用[J]. *影像科学与光化学*, 2020, 38(3): 560-565.

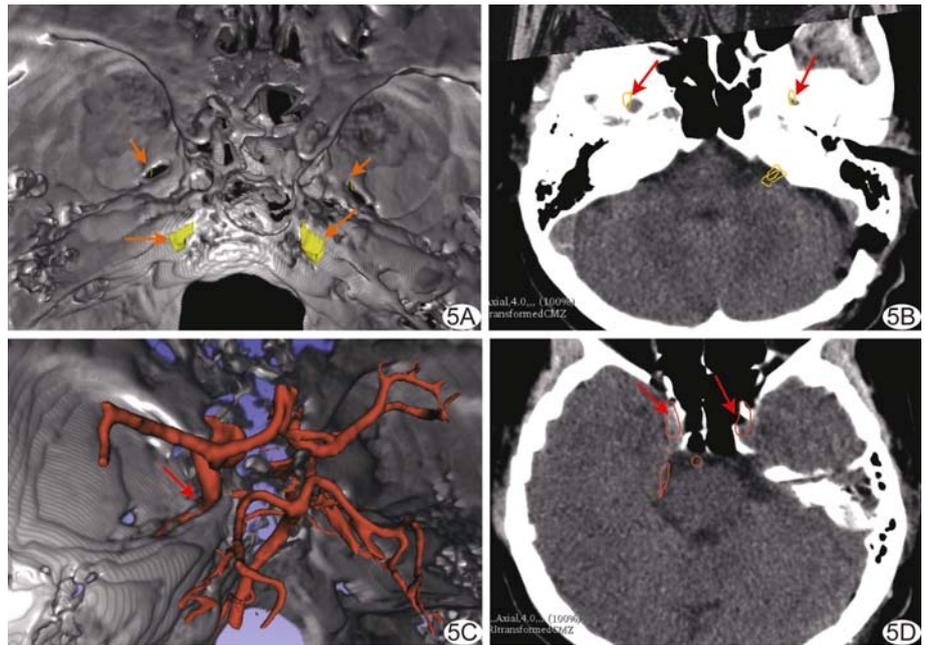


图5 患者女,76岁,PTN,基于MRA血管-神经根重建与CT叠加效果图 A. CT渲染颅底部叠加显示三叉神经根(长箭)、下颌神经(短箭); B. 下颌神经模型(箭)在头部轴位CT断层图中的投影; C. CT渲染颅底部叠加显示左侧颈内动脉(箭); D. 双侧颈内动脉(箭)在头部轴位CT断层图中的投影

- [6] 朱敏, 周小飞, 李平. 3D FIESTA 联合 3D TOF MRA 对三叉神经血管压迫的诊断价值[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2015, 13(3): 241-243.
- [7] 郭田田, 陈聚惠, 苗重昌, 等. 3.0T MR 三维时间飞跃与三维稳态采集快速成像序列融合图像术前评估三叉神经、面神经与邻近血管关系[J]. *中国医学影像技术*, 2018, 34(6): 836-840.
- [8] 陈凯, 李天然, 杨平生, 等. 三叉神经责任血管 MRTA 扫描序列的优化[J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(2): 298-301.
- [9] 李仲夏, 李宗芳, 张振光, 等. 磁共振弥散张量成像在神经血管压迫关系所致原发性三叉神经痛中的应用[J]. *实用医学杂志*, 2016, 32(6): 907-910.
- [10] 乔梁, 朱宏伟, 陶蔚, 等. 神经导航引导下三叉神经半月节射频热凝术电生理及疗效研究[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2015, 21(11): 862-864.
- [11] ZHU R, LI X, ZHANG X, et al. MRA and CT medical image fusion based on synchronized-anisotropic diffusion model [J]. *IEEE ACCESS*, 2020, 8(2): 91336-91350.
- [12] 李加恒. 基于多尺度变换的医学图像融合算法研究与应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 1-89.
- [13] 季达峰, 马忠宾. 基于表面解剖特征的人头部计算机断层与磁共振图像双模态融合[J]. *解剖学报*, 2019, 50(5): 638-644.
- [14] MOBASHIR M K, BASHA W M, MOHAMED A E S, et al. Posterior canal wall reposition for management of cholesteatoma: Technique and results[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2018, 45(2): 254-260.