

## MRI-CT 图像融合对脑胶质瘤术后放疗靶区的影响

李丹明, 武新虎, 朱锡旭

Impact of MRI-CT Image Registration on Target Delineation  
of Postoperative Radiotherapy for Gliomas

LI Dan-Ming, WU Xin-Hu, ZHU Xi-Xu

[ABSTRACT] **BACKGROUND & OBJECTIVE:** Magnetic resonance imaging (MRI) can well distinguish soft tissue, but its usage in radiotherapy for brain tumors was limited by its image distortion and lack of electron density for dosage calculation. The registration of MRI with computed tomography (CT) could resolve this problem. This study was to investigate the registration accuracy of MRI-CT image, and compare the change of center position, clinical target volume (CTV) and volume of organs at risk (OARs). **METHODS:** Nine glioma patients were examined by MRI and CT after operation. The registration accuracy of MRI-CT was evaluated. The changes of CTV, volume of OARs, and center position were investigated by the method of volume and center of geometry (COG) respectively. COG was used to measure the distance between center positions on MRI-CT registration image and CT location image. The volume method was used to measure the percentage of the volume of registration area ( $V_{\text{MRI-CT}}$ ) to the total volume ( $V_{\text{MRI+CT}}$ ). **RESULTS:** The registration accuracy by the method of artificial landmarks was less than 1.5 mm, which reached the error requirement for brain tumors. No significant change of volume of OARs was found ( $P>0.05$ ). Of the 9 patients, 8 had decreased CTV (by 13.85%–73.59%) on MRI-CT registration image and 1 had increased CTV (by 10.35%). The difference in mean CTV between the 2 groups was significant ( $P<0.05$ ). The change of central position of CTV was the largest [ $(8.74\pm6.60)$  mm], those of 2 eyes were the next [ $(5.25\pm2.38)$  mm for the left eye;  $(5.65\pm2.56)$  mm for the right eye], and that of the brain stem was the least [ $(1.83\pm1.06)$  mm]. **CONCLUSIONS:** By the method of artificial landmarks, MRI-CT has better registration accuracy. MRI-CT registration can reduce the uncertainty of CTV delineation in radiation treatment planning for glioma patients after operation. **KEYWORDS:** Brain neoplasm; Glioma; Surgical operation; Radiotherapy; MRI-CT; Image registration; Target volume

南京军区南京总医院  
放射治疗科,  
江苏 南京 210002

Department of Radiation Oncology,  
Nanjing General Hospital of  
Nanjing Military Command,  
Nanjing, Jiangsu, 210002,  
P. R. China

通讯作者:朱锡旭

Correspondence to:ZHU Xi-Xu

Tel:86-25-80860079

Fax:86-25-80860079

E-mail:llddy1976@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-06-12

修回日期:2007-09-19

【摘要】背景与目的:核磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)图像对软组织结构具有较高的分辨率,但由于失真和缺乏剂量计算所需要的电子密度而限制了其在脑部肿瘤放射治疗中的应用,而MRI和CT图像融合可解决这一问题。本研究探讨MRI与CT的图像融合精度,及其对脑胶质瘤术后患者放疗临床靶区(clinical target volume,CTV)及危及器官(organs at risk,OARs)体积和中心位置的影响。方法:9例颅内胶质瘤术后患者MRI和CT图像采用标点法进行融合,评价其融合精度,分别采用体积法及几何中心法(center of geometry,COG)研究融合前后临床靶区和危及器官体积和中心的变化,测定病灶MRI-CT融合图像的COG与CT定位图像COG的距离,体积法测定病灶MRI与CT图像融合部分体积( $V_{\text{MRI-CT}}$ )占总体积( $V_{\text{MRI+CT}}$ )的百分比( $P_{\text{MRI-CT}}$ )。结果:采用人工标记法进行融合的精度小于1.5 mm,完全达到脑部肿瘤的误差要求。融合后各危及器官体积无明显改变( $P>0.05$ );9例患者中8例融合界面勾画的CTV体积比CT定位图像CTV体积减小13.85%~73.59%,1例体积增大10.35%;平均体积比较差异有统计学意义( $P<$

0.05); 融合后 CTV 的中心位置变化最大 $[(8.74\pm6.60)\text{mm}]$ , 其次为双眼[左右眼分别为 $(5.25\pm2.38)\text{mm}$ 和 $(5.65\pm2.56)\text{mm}$ ], 脑干位置变化最小 $[(1.83\pm1.06)\text{mm}]$ 。结论:采用人工标记的方法进行图像融合具有较高的融合精度, MRI 与 CT 融合的方法可明显减少脑胶质瘤术后放疗 CTV 勾画的不确定性。

关键词:脑肿瘤; 胶质瘤; 外科手术; 放射治疗; MRI-CT; 图像融合; 放疗靶区

中图分类号:R73 文献标识码:B  
文章编号:1000-467X(2008)05-0544-05

CT图像一直是调强适形放射治疗(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)中的靶区和危及器官勾画的最佳图像资源,由于CT对具有相似电子密度的软组织结构区分能力很差,在对颅内肿瘤术后放射治疗的患者进行靶区勾画时,由于水肿区的存在以及手术后正常解剖结构的改变,在CT上很难对临床靶区(clinical target volume,CTV)和

大体肿瘤靶区(gross target volume, GTV)进行定界,容易造成靶区勾画的不确定性,从而影响到IMRT的疗效。MRI图像在这一方面具有较强的分辨能力,但不能直接用于放射治疗计划。如果将两种图像进行融合,则可结合两种图像的优势,提高靶区勾画的精确性。我们对南京军区南京总医院放射治疗科收治的9例颅内胶质瘤的患者MRI图像和CT定位图像进行了融合,并对融合后CTV及危及器官体积和中心位置的变化进行了初步探讨。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2006年10月至2007年3月在南京军区南京总医院放射治疗科进行IMRT治疗的颅内胶质瘤患者9例,其中男性6例,女性3例;年龄25~72岁,中位年龄46岁;中位卡氏评分90(80~100);其中胶质瘤Ⅱ级5例,Ⅲ级2例,Ⅳ级2例。所有患者均取得术后病理学或细胞学诊断。

1.2 方法

1.2.1 体位固定 患者取仰卧位,热塑头颈膜成形,在头膜上确定4个参考点,确保4个参考点不在同一层面,标记点之间的距离保证在20 mm以上,所有患者均给予增强,层厚3 mm,扫描范围包括全颅。

1.2.2 MRI定位 所有患者出院后均未给予激素和脱水剂处理,MRI定位于手术后 $(20\pm5)\text{d}$ 进行。仪器为美国GE公司Signa CV/I型1.5T超导磁共振成像仪,扫描层厚3 mm,扫描参数如下:重复时间(TR):400~500 ms;回波时间(TE)15 ms;矩阵:512×512,FOV:240 mm×240 mm,采集时间大约3 min(见图1)。

1.2.3 CT定位 CT定位时间在MRI定位后的6~8 h进行。仪器为Siemens公司Biograph Sensation 16型LSO晶体PET/CT,定位CT的矩阵:256×256,FOV:300 mm×300 mm,采集时间大约4 s。肘静脉注射优维显50 mL,所有患者取与MRI相同的位置、扫描层厚、扫描范围(见图1)。

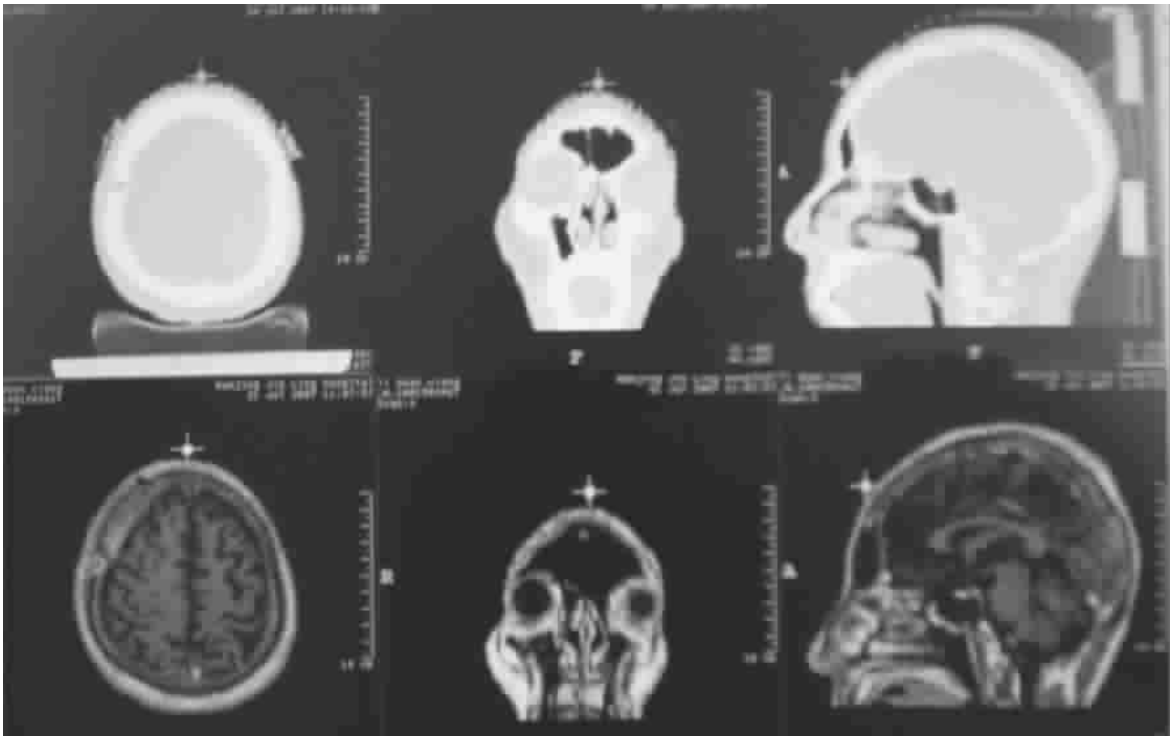


图1 CT和MRI轴位、冠状位及矢状位人工标记点示意图

Figure 1 An artificial landmark on transverse, coronal and sagittal plane in CT and MRI images

The above 3 images show the artificial landmarks on transverse, coronal and sagittal CT images; the below 3 images show the artificial landmarks on transverse, coronal, and sagittal MRI-CT registration images at the same slices as on CT images.

1.2.4 图像融合 先将 MRI 和 CT 图像分别传入 Precise Plan 工作站,在融合界面下采用 Tris-Axes Landmark 方法<sup>[1]</sup>对 T<sub>1</sub>WI 增强相和 CT 定位图像进行融合,以 MRI 图像与 CT 定位图像上相应标记点的距离误差表示融合精度<sup>[1]</sup>,选择融合分数达到 8.0 以上者(满分 10 分)作为研究对象(见表 1)。

1.2.5 靶区勾画 由一名放疗医生和一名 CT 诊断医生联合阅片,首先在融合横断图像上勾画感兴趣区(volume of interest,VOI),命名为 VOI<sub>MRI</sub>,在此之前,这两位医生均未看到 MRI 检查定位结果。VOI 包括 CTV 和危及器官左、右眼及脑干。CTV 包括手术区域和术后水肿区(见图 2)。

将勾画的 VOI 导入 CT 定位图像上,在治疗计划界面下,隐藏已有的 VOI<sub>MRI</sub>,然后由同两名医生在 CT 定位图像上逐层勾画 VOI,命名为 VOI<sub>CT</sub>。在计划系统上可自动得出融合界面和定位 CT 界面下 VOI 的三维体积,分别命名为 V-VOI<sub>MRI</sub> 和 V-VOI<sub>CT</sub>。不同图像靶区勾画的时间间隔至少在两周以上。放疗科医生具有 3 年以上调强适形放疗的临床工作经验,CT 诊断医生具有 10 年以上临床工作经验。

1.2.6 危及器官的融合精度分析 根据相关资料<sup>[2]</sup>, (1)体积法:在融合图像上沿 CTV<sub>MRI</sub> 和 CTV<sub>CT</sub> 的最外缘由计划系统自动勾画出病灶的融合图像和 CT 图像总的轮廓,命名为 CTV<sub>MRI+CT</sub>,并得出病灶的融合图像和 CT 图像叠加在一起的总的体积(V-CTV<sub>MRI+CT</sub>)。病灶 MRI 和 CT 图像融合部分的体积(V<sub>MRI-CT</sub>)可由公式  $V-CTV_{MRI+CT}=V-CTV_{MRI}+V-CTV_{CT}-V-CTV_{MRI+CT}$  得出,并计算融合部分体积(V-CTV<sub>MRI-CT</sub>)占总体积(V-CTV<sub>MRI+CT</sub>)的百分比( $P-CTV_{MRI-CT}=V-CTV_{MRI-CT}/V-CTV_{MRI+CT}$ )。危及器官的体积计算同此法。(2)几何中心法(center of geometry,COG):以热塑头膜上定位参考点的中心为原点,采用计划系统自动测出靶区在 X、Y、Z 轴上的坐标位置(x,y,z),两个靶区中心间的距离(D<sub>COG</sub>)利用公式  $D_{COG}=\sqrt{\delta(x^2+y^2+z^2)}$  计算。计算融合界面和 CT 界面下 CTV、左眼、右眼和脑干的中心距离。

1.3 统计学处理

采用 SPSS12.0 软件处理实验数

据,数据均以均数±标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,各组间差异比较偏态分布采用 Wilcoxon 配对检验,正态分布采用配对 t 检验,P<0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 三维空间各个方向的融合精度  
9 例患者 X 轴方向的平均距离误

差为 (0.35±0.11)mm;Y 轴方向的平均距离误差为 (0.23±0.11)mm;Z 轴方向的平均距离误差为 (0.43±0.17)mm。三维空间平均距离误差为 (0.69±0.15)mm。三维空间最大距离误差为 1.32 mm,完全符合头部肿瘤误差小于 2 mm 的临床要求(见表 2)。

表 1 1 例患者四个标记点各个方向的融合误差、总的平均误差及融合分数  
Table 1 The registration errors, total average errors and registration score of MRI-CT along every direction on 4 landmarks in a glioma patient

Artificial landmark	Registration error			
	Δx(mm)	Δy(mm)	Δz(mm)	Mean(mm)
A	-0.87	0.17	0.07	0.89
B	0.52	0.59	0.42	0.90
C	0.27	-0.19	0.06	0.33
D	0.08	-0.57	-0.55	0.88

Δx represents the errors on left-right direction; Δy represents the errors on antero-posterior direction; Δz represents the errors on cranio-caudal direction. The mean error of the 4 landmarks is 0.73 mm. The registration score is 8.40.

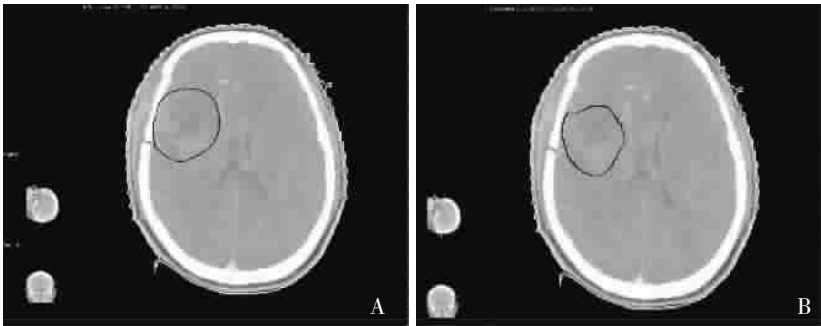


图 2 定位 CT 和同一层面的 MRI-CT 融合图像上勾画的 CTV  
Figure 2 Clinical target volume (CTV) delineated on location CT image (A) and MRI-CT registration image (B) at the same slice

表 2 融合精度的定量分析  
Table 2 Registration accuracy of MRI-CT for the 9 glioma patients

Patient's No.	Δx(mm)	Δy(mm)	Δz(mm)	Δd(mm)	Δd <sub>min</sub> (mm)	Δd <sub>max</sub> (mm)
1	0.29±0.23	0.18±0.05	0.34±0.28	0.52±0.28	0.13	0.78
2	0.40±0.28	0.15±0.12	0.60±0.45	0.80±0.40	0.42	1.32
3	0.14±0.11	0.40±0.25	0.54±0.45	0.76±0.37	0.34	1.25
4	0.36±0.13	0.16±0.12	0.43±0.22	0.60±0.20	0.32	0.78
5	0.44±0.28	0.13±0.11	0.34±0.24	0.61±0.20	0.44	0.90
6	0.52±0.23	0.15±0.10	0.23±0.05	0.59±0.23	0.31	0.85
7	0.32±0.24	0.27±0.20	0.15±0.13	0.49±0.23	0.23	0.76
8	0.28±0.23	0.25±0.22	0.57±0.58	0.84±0.33	0.43	1.14
9	0.39±0.11	0.40±0.32	0.65±0.46	0.97±0.22	0.70	1.24

Δd represents the distance error in 3-D space; Δd<sub>min</sub> represents the minimal distance in 3-D space; Δd<sub>max</sub> represents the maximal distance in 3-D space. All values of Δx, Δy, Δz, and Δd are presented as mean±SD of 4 landmarks.

2.2 融合前后 CTV 改变的比较  
与 CT 定位图像的 CTV 相比,MRI-CT 图像融合后,8 例 CTV 体积减小 13.85%~73.59% (中位数 47.31%);1 例 CTV 增大 10.35% (见图 3)。采用 Kolmogorov-Smirnov 方法对

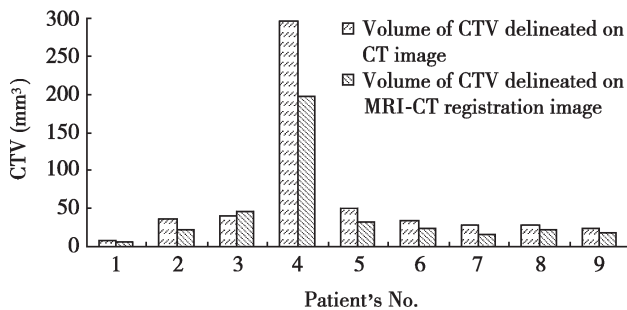


图 3 融合前后 CTV 体积的变化

Figure 3 Comparison of the volume of CTVs on CT and MRI-CT registration images

MRI-CT 融合图像 CTV 体积进行正态分布检验,  $Z$  值=0.369, 偏度系数 Skewness = 2.808, 峰度系数 Kurtosis = 8.123,  $P<0.01$ ;CT 定位图像的 CTV 体积进行正态分布检验,  $Z$  值=0.438, 偏度系数 Skewness = 2.899, 峰度系数 Kurtosis=8.563,  $P<0.001$ ;故两组数据均为偏态分布。采用 Wilcoxon 配对检验进行两组间比较,  $Z$  值= -2.429,  $P<0.05$ ,

两者比较差异具有统计学意义。  
2.3 融合前后危及器官融合体积改变的比较  
三种危及器官体积值为正态分布,采用配对  $t$  检验。从表 3 可见,三种危及器官融合前后体积无明显变化 ( $P>0.05$ )。而左右双眼的融合体积百分比分别为  $(48.27 \pm 21.43)\%$  和  $(48.18 \pm 19.76)\%$ ,脑干为  $(74.72 \pm 12.24)\%$ 。

表 3 融合前后危及器官体积改变的比较

Table 3 Comparison of the volume of organs at risks (OARs) on MRI-CT registration image

OARs	Registration volume (cm³)	CT volume (cm³)	t value	P value	The percentage of registration volume (%)	Median (%)
Left eye	6.30±0.59	6.21±0.66	1.000	0.347	48.27±21.43	53.01
Right eye	6.13±0.69	6.31±0.54	0.912	0.388	48.18±19.76	56.71
Brain stem	24.76±2.75	24.87±2.83	0.254	0.806	74.72±12.24	79.80

All values are presented as mean±SD of the 9 glioma patients.

2.4 融合前后 CTV、左右眼及脑干与 CT 界面下几何中心改变的比较

采用 COG 法测定所有 CTV 的融合精度为  $(8.74 \pm 6.60)$ mm (中位数 7.42 mm);左眼的融合精度为  $(5.25 \pm 2.38)$ mm (中位数 4.99 mm);右眼的融合精度为  $(5.65 \pm 2.56)$ mm (中位数 4.97 mm);脑干的融合精度为  $(1.83 \pm 1.06)$ mm (中位数 1.79 mm)。融合后 CTV 中心位置的变化最大,其次为双眼,脑干位置变化最小。

3 讨论

IMRT 是目前最前沿的放射治疗手段,而对肿瘤靶区的准确勾画是确保 IMRT 治疗优势的首要因素,将各种影像学图像引入放射治疗计划中,提高靶区勾画的精确性已经成为放射治疗的研究焦点。目前国内外开展最多的是将 PET 图像与 CT 图像进行同机融合的分

子生物靶区确定方法,研究证明两者同机融合后明显提高了适形放射治疗中肿瘤 GTV、CTV 以及危及器官勾画的精确性,提高了患者的生存率,降低了肿瘤的复发率,从而提高了 IMRT 的治疗效率<sup>[3,4]</sup>。但由于 PET 机器昂贵,不是所有医院都能开展,而 MRI 则相对经济,且其对软组织内的边界界定比 PET 更为明确,故更易在临床推广和使用。

颅内肿瘤术后采用 IMRT 方法制订治疗计划,在对靶区进行勾画时,由于手术造成水肿区的存在以及解剖结构的改变,在 CT 上很难对 CTV 和周围正常组织进行界定,从而成为影响 IMRT 精确治疗效果的重要因素之一。目前放疗计划系统都是以 CT 图像为基础,虽然 MRI 图像对软组织结构具有较好的分辨能力,但由于失真和缺乏剂量计算所需要的电子密度而限制了其在放射治疗计划制订中的应用,将二者结合起来可成为提高 IMRT 治疗效果的重要手段。黄穗乔等<sup>[5]</sup>运用功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)的方法术前确定手运动功能皮层的位置及其与肿瘤的关系后认为, fMRI 能帮助确定中央沟附近的脑肿瘤与手运动功能区位置的关系,从而为外科手术提供参考。汪家旺等<sup>[6]</sup>以颅内病变为对象,采用 Legendre 正交矩的融合方法,研究了将 CT 和 MRI 图像进行融合的可行性,认为两者的结合可为不同的影像提供互补信息,增加图像的信息量,使图像更加鲜明生动,从而为临床诊断和治疗的定位、观察提供有效的方法。

Sannazzari 等<sup>[7]</sup>等比较了前列腺癌患者 CT 和 MRI 图像融合的前列腺体积和位置,结果发现 CT 图像的 CTV 比 MRI-CT 融合图像的 CTV 平均高估了 34%,在前后和上下方向,CT 上的 CTV 要比 MRI 图像大 5 mm,两者的剂量-体积直方图 (dose volume histograms, DVH) 的比较表明:融合部分直肠体积是 10%,膀胱和股骨头 5%,这说明 CT 图像对 CTV 过度估计。Krempien 等<sup>[8]</sup>在对 16 例复发的各类肿瘤的近距离放疗的计划系统中采用 CT 和 MRI 融合图像,融合精度达  $(1.8 \pm 0.9)$ mm,而单独使用 CT,肿瘤则很难界定。这说明将 MRI 和 CT 图像融合引入治疗计划系



统提高了靶区和危及结构的能力。Khoo 等<sup>[9]</sup>将颅底脑膜瘤患者的 CT 和 T<sub>1</sub> 增强相采用 chamfer-matching 方法进行图像融合,以 1.5 mm 为评价标准,结果发现 MRI 定义的 CTV 比 CT 定义的更大,但并没有完全包括 CT-CTVs,虽然平均向量差异很小,但每个边界的差异很大,因此,作者认为 MRI 和 CT 图像可相互补充。Ferroli 等<sup>[10]</sup>对 10 例有运动疾患的患者采用术后 MRI 与术前 CT 图像融合技术研究脑深部刺激技术 (DBS) 电极放置的精确性发现:电极放置的前后误差为 (0.61±0.22)mm,外侧误差为 (0.65±0.27)mm,垂直误差为 (0.82±0.31)mm,图像融合可提高电极放置的精确性。Cattaneo 等<sup>[1]</sup>将脑胶质瘤患者术前的 MRI 与术后 CT 图像相融合,评价了 5 名临床医生之间勾画靶区的差别,结果发现:融合精度小于 3.7 mm,CT+MRI 融合组的一致性指数 [(47.4±12.4)%] 明显优于根据术前 MRI 在定位 CT 图像勾画组 [(14.1±12.7)%]。CT+MRI 融合组的部分融合体积为 (67±15)%,明显高于非融合组的 (24±18)%,因此笔者认为 CT 和 MRI 图像融合可减少高级别胶质瘤 (HGG) 术后不同医生之间放射治疗靶区勾画的差别。

我们对 9 例原发肿瘤位于脑实质内难以定界的胶质瘤患者术后 MRI 和定位 CT 图像,在同样的扫描层厚,同样体位的条件下,采用标点法进行融合,融合后的最大误差仅有 1.32 mm,说明标点法融合精度较高,两种图像上勾画的 CTV 体积比较表明:CTV 体积 8 例减小,1 例增大,CT 图像的 CTV 比 MRI-CT 融合图像的 CTV 平均高估了 47.31%,而且不同患者之间的差异变化很大,这说明根据术前 MRI 在 CT 定位图像上勾画 CTV 的方法,可能会造成靶区偏大,导致正常脑组织受量过多,

使放射性脑损伤的概率增加,这一结果与 Sannazzari 等<sup>[7]</sup>的报道一致。另外,CTV 的中心发生了明显偏移,平均达 7.42 mm,这一差异在头部肿瘤放疗中是不可忽视的,基于 MRI 图像对于软组织结构的区别能力较强这一认识,我们认为采用 MRI 和 CT 图像融合后进行靶区的勾画对 IMRT 具有积极的临床意义。而在头部肿瘤危及器官中,双眼的边界较为清楚,从研究结果可以看出双眼融合前后的体积非常接近,但中心明显偏移,这与眼球的活动度较大有关。而脑干不论体积和中心,融合前后改变都是最小的,特别是中心的移动度最大小于 3 mm,最小仅有 0.7 mm,这说明以脑干中心为参考点具有较大的准确性。

综上所述,利用 MRI-CT 融合图像制定放疗计划时,融合精度对靶区的勾画有明显影响,采用融合图像制订放疗计划时必须对融合精度进行测定,并采取有效措施降低融合误差。目前这项技术处于刚刚开始阶段,尚有许多问题需进一步探讨,但将 MRI 引入 IMRT 计划系统,提高 IMRT 的临床疗效,将成为放射治疗领域的研究方向。

# [参 考 文 献]

[1] Cattaneo G M, Reni M, Rizzo G, et al. Target delineation in post-operative radiotherapy of brain gliomas: inter-observer variability and impact of image registration of MR (pre-operative) images on treatment planning CT scans [J]. Radiother Oncol, 2005,75 (2): 217-223.

[2] 邢力刚,孙晓蓉,于金明,等. PET-CT 图像融合精度对非小细胞肺癌放疗计划的影响 [J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2005,14(4):314-318.

[3] Messa C, Ceresoli G L, Rizzo G, et al. Feasibility of [18F]FDG-PET and

coregistered CT on clinical target volume definition of advanced non-small cell lung cancer [J]. Q J Nucl Med Mol Imaging, 2005,49 (3):259-266.

[4] Brianzoni E, Rossi G, Ancidei S, et al. Radiotherapy planning: PET/CT scanner performances in the definition of gross tumour volume and clinical target volume [J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2005,32 (12):1392-1399.

[5] 黄穗乔,梁碧玲,谢榜昆,等. 功能磁共振成像在神经外科应用的初步经验 [J]. 癌症, 2006,25(3):343-347.

[6] 汪家旺,罗立民,舒华忠,等. CT,MR 图像融合技术临床应用研究 [J]. 中华放射学杂志, 2001,35(8):604-608.

[7] Sannazzari G L, Ragona R, Ruo Redda M G, et al. CT-MRI image fusion for delineation of volumes in three-dimensional conformal radiation therapy in the treatment of localized prostate cancer [J]. Br J Radiol, 2002, 75(895):603-607.

[8] Krempien R C, Daeuber S, Hensley F W, et al. Image fusion of CT and MRI data enables improved target volume definition in 3D-brachytherapy treatment planning [J]. Brachytherapy, 2003,2(3):164-171.

[9] Khoo V S, Adams E J, Saran F, et al. A comparison of clinical target volumes determined by CT and MRI for the radiotherapy planning of base of skull meningiomas [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2000,46(5):1309-1317.

[10] Ferroli P, Franzini A, Marras C, et al. A simple method to assess accuracy of deep brain stimulation electrode placement: pre-operative stereotactic CT + postoperative MR image fusion [J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2004, 82(1):14-19.

[编辑及校对:庄爱华]