

算法和匹配数目对宫颈癌危及器官自动勾画的影响

王金媛¹, 徐寿平^{1,2}, 杨微¹, 张慧娟¹, 曲宝林^{1,2}, 郑庆增³

1. 中国人民解放军总医院放疗科, 北京 100853; 2. 北航大数据精准医疗高精尖创新中心, 北京 100083; 3. 北京老年医院放疗科, 北京 100095

【摘要】目的:探讨基于Atlas实施宫颈癌危及器官自动勾画时勾画算法及匹配数目对自动勾画结果的影响。**方法:**基于MIM-Maestro软件建立宫颈癌Atlas模板库, 入库病例数目为60例。随机选择Atlas库外10例宫颈癌患者, 由临床医生手动勾画危及器官(膀胱、直肠和双侧股骨头), 并定义为参考勾画(V_{ref})。应用多数投票算法和STAPLE算法, 匹配数分别选择1、3、5、7、9进行自动勾画。采用勾画时间(T)、相似性系数(DSC)、敏感性指数(SI)、质心偏差(DC)、Jaccard系数(JAC)、Hausdorff距离(HD)评价勾画结果, 并进行单因素方差分析和配对样本 t 检验。**结果:**勾画时间随匹配数目增大呈线性增加, 与勾画算法无关。多数投票算法和STAPLE算法勾画结果均显示, 匹配数为1时膀胱的SI和左股骨头的DSC、HD、JAC与匹配数为3、5、7、9时有统计学差异。STAPLE算法中, 直肠和双侧股骨头的SI均显示匹配数目为1、3与5、7、9有统计学差异。两种勾画算法的比较结果显示, 仅双侧股骨头的SI有统计学差异。**结论:**基于Atlas实施危及器官自动勾画时, 勾画算法对结果基本无影响, 所需时间与匹配数呈正比, 综合勾画结果建议匹配数目选择3。

【关键词】宫颈癌; 危及器官; 放射治疗; 自动勾画

【中图分类号】R730.55; R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)11-1243-06

Effects of algorithm and matching number on the auto-segmentation of organs-at-risk in patients with cervical cancer

WANG Jinyuan¹, XU Shouping^{1,2}, YANG Wei¹, ZHANG Huijuan¹, QU Baolin^{1,2}, ZHENG Qingzeng³

1. Department of Radiotherapy, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; 2. Beihang Advanced Innovation Center for Big Data-based Precision Medicine, Beijing 100083, China; 3. Department of Radiotherapy, Beijing Geriatric Hospital, Beijing 100095, China

Abstract: Objective To evaluate the effects of segmentation algorithms and matching numbers on the Atlas-based auto-segmentation of organs-at-risk (OAR) in patients with cervical cancer. **Methods** The Atlas database of cervical cancer which contains 60 cases was established with MIM-Maestro software. Another 10 patients with cervical cancer were randomly selected out of the Atlas database. The manual segmentations of OAR, namely bladder, rectum and bilateral femoral head, by an experienced radiation oncologist, were defined as the reference volume (V_{ref}). Subsequently, the OAR were automatically segmented by majority vote algorithm *versus* STAPLE algorithm, with the matching number of 1, 3, 5, 7 and 9. The segmentation results were assessed using time for segmentation (T), Dice similarity coefficient (DSC), sensitivity index (SI), deviation of centroid (DC), Jaccard coefficient (JAC) and Hausdorff distance (HD). The results were also analyzed with one-way analysis of variance and paired sample t test. **Results** The time for segmentation was independent of the algorithm and increased linearly with the increasing of matching number. The results obtained by majority vote algorithm and STAPLE algorithm showed that there were statistical differences in the SI of bladder and the DSC, HD, JAC of left femoral head between the matching number of 1 and 3, 5, 7, 9. For STAPLE algorithm, the SI of bladder and bilateral femoral head showed statistical differences between the matching number of 1, 3 and 5, 7, 9. Moreover, significant difference was only found in the SI of bilateral femoral head between two algorithms. **Conclusion** The effect of segmentation algorithms on the Atlas-based OAR auto-segmentation is trivial. The time for segmentation was positively correlated with matching number. With the comprehensive consideration of segmentation

【收稿日期】2019-06-11

【基金项目】国家重点研发计划(2017YFC0112100); 解放军总医院临床科研扶持基金(2017FC-TSYS-3005)

【作者简介】王金媛, 硕士研究生, 物理师, 主要从事放射剂量学和图像处理方向研究, E-mail: kyjinyuan@126.com

【通信作者】徐寿平, 高级工程师, 主要从事肿瘤精确放疗及自适应放疗方向研究, E-mail: shouping_xu@yahoo.com

results, the matching number of 3 is recommended for clinical application.

Keywords: cervical cancer; organs-at-risk; radiotherapy; auto-segmentation

前言

放射治疗过程中危及器官轮廓的勾画是一个极其重要的环节。常规医生手动勾画耗时、费力,而且勾画者之间具有较大的差异性^[1],自动勾画软件的出现能够在一定程度上帮助医生提高勾画效率^[2],减少勾画者之间的差异性^[3]。但对自动勾画软件勾画结果的评价^[4]以及提高自动勾画精确性的方法^[5]仍在不断的探索中。

MIM-Maestro 软件作为一款医学图像和信息管理软件,主要用于多模态医学图像的配准和融合、放射治疗剂量的叠加、自动器官轮廓勾画等。MIM-Maestro 将含有勾画数据的模板 CT 图像组成自定义图谱库,新病例 CT 图像与图谱库中不同对象进行比较找出最佳的匹配,匹配后基于密度进行形变配准,将模板中 CT 图像形变至目标 CT 图像中,与此同时模板中解剖结构轮廓通过形变配准参数转换到目标 CT 图像,进而快速得到最终器官轮廓勾画的结果。

本研究拟运用 MIM-Maestro 软件 (Version 6.6.5) 进行宫颈癌危及器官的自动勾画,探究勾画算法以及勾画匹配数对自动勾画结果的影响,以期在临床应用匹配数和勾画算法的选择提供一定的参考或指导。

1 材料与方法

1.1 实验方法

选取 70 例 2014 年 7 月~2017 年 4 月期间中国人民解放军总医院收治的宫颈癌患者。患者均采用体膜固定,仰卧位行定位扫描,定位前半小时饮用 500 mL 水并进行憋尿。采用 Siemens 大孔径 CT (Siemens SOMATOM 64 排) 实施 CT 扫描,层厚为 3 mm,将所得图像通过 DICOM 传输至 Eclipse 计划系统 (Version 10.0),由一名经验丰富的临床医生在 CT 图像上手动勾画出危及器官并定义为 V_{ref} ($V_{reference}$, 参考勾画),目标勾画包括膀胱、直肠和双侧股骨头。

应用 MIM-Maestro 软件 (Version 6.6.5) 建立宫颈癌图谱库,图谱库中包含模板病例 60 例,分别应用多数投票算法及 STAPLE 算法,选择 1、3、5、7、9 个勾画匹配数对另外 10 例目标 CT 图像进行危及器官的自动勾画并分别计时,将应用多数投票算法的自动勾画结果定义为 $V_{AC-MV-1}$ 、 $V_{AC-MV-3}$ 、 $V_{AC-MV-5}$ 、 $V_{AC-MV-7}$ 、 $V_{AC-MV-9}$,将应用 STAPLE 算法的自动勾画结果定义为

$V_{AC-STAPLE-1}$ 、 $V_{AC-STAPLE-3}$ 、 $V_{AC-STAPLE-5}$ 、 $V_{AC-STAPLE-7}$ 、 $V_{AC-STAPLE-9}$ 。运用评价参数将各组自动勾画的结果与 V_{ref} 进行比较,得出勾画算法及匹配数目对自动勾画结果的影响。

1.2 勾画算法介绍

多数投票算法:在自动轮廓勾画的过程中,选择图谱库中与目标 CT 图像匹配度最高的图像并将勾画轮廓通过形变配准传递到目标图像后,为将目标图像的所有分割结果合并为最终的轮廓勾画结果而采用的算法。通过检测目标 CT 图像中所有体素与自动勾画轮廓的对应区域,并对自动勾画轮廓加权评分,进而得到最终的勾画结果^[6]。

STAPLE (Simultaneous Truth and Performance Level Estimation) 算法:同步真值和性能等级评估算法,与多数投票算法在自动轮廓勾画中应用的节点相同,采用期望最大化方法,计算真值分割结果的概率性预估以及每个分割结果所代表的性能等级的评估,即计算每个自动勾画分割结果对其组合勾画的影响,并赋予其期望值,根据期望值形成最终勾画^[7]。

1.3 评价参数

(1) 勾画时间:分为自动勾画时间和手动勾画时间。

(2) Dice 相似性系数 (Dice Similarity Coefficient, DSC)^[8]:

$$DSC = \frac{2 \times (V_{ref} \cap V_{auto})}{V_{ref} + V_{auto}} \quad (1)$$

其中, V_{ref} 为参考勾画的体积, V_{auto} 为自动勾画的体积。

(3) 质心偏差 (Deviation of Centroid, DC):

$$DC = \sqrt{(x_{auto} - x_{ref})^2 + (y_{auto} - y_{ref})^2 + (z_{auto} - z_{ref})^2} \quad (2)$$

(4) 敏感性指数 (Sensitivity Index, SI)^[9]:

$$SI = \frac{V_{ref} \cap V_{auto}}{V_{ref}} \quad (3)$$

(5) Jaccard 系数 (Jaccard Index, JAC)^[10]:

$$JAC = \frac{V_{ref} \cap V_{auto}}{V_{ref} \cup V_{auto}} \quad (4)$$

(6) Hausdorff 距离 (Hausdorff Distance, HD)^[11]:

假设有两组集合 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 、 $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$, 则这两个点集合之间的 HD 定义为:

$$HD(X, Y) = \max(h(X, Y), h(Y, X)) \quad (5)$$

其中, $h(X, Y) = \max_{x \in X} \min_{y \in Y} \|x - y\|$ 。

1.4 统计学分析

应用 SPSS 22 软件,采用单因素方差法对各匹配数勾画结果进行统计学分析,并采用最小显著性差

异法(LSD)进行事后多重比较;采用配对样本 *t* 检验对两种算法勾画结果进行统计学分析, *P*<0.05 为差异具有统计学意义。

2 结 果

2.1 多数投票算法勾画结果

应用多数投票算法的勾画结果如表 1 所示,自动勾画所需时间随匹配数目的增加呈线性增加,但均小于手动勾画时间(10.25±0.58) min。对于膀胱,仅

SI 显示匹配数为 1 时与其他 4 组有显著性差异,匹配数为 3、5、7、9 的勾画结果基本相同,均优于匹配数为 1 的勾画结果。对于直肠,各参数结果无统计学差异,DSC、DC、HD、JAC 均值基本一致,SI 均值随匹配数的增加而减小。对于左侧股骨头,DSC、HD、JAC 均显示匹配数为 1 的结果与其他 4 组有显著性差异,SI 均值随匹配数增加而增大,DC 均值随匹配数的增加而减小。右侧股骨头的各参数均无统计学差异,各参数均值随匹配数的增加呈向好趋势。

表 1 不同匹配数自动勾画危及器官的参数结果(多数投票算法)($\bar{x} \pm s$)
Tab.1 Results of auto-segmentation of organs-at-risk by different matching numbers (majority vote algorithm) (*Mean ± SD*)

参数	V _{AC-MV-1}	V _{AC-MV-3}	V _{AC-MV-5}	V _{AC-MV-7}	V _{AC-MV-9}	<i>P</i> 值
时间/min	0.94±0.07	1.89±0.09	2.88±0.19	3.91±0.21	4.97±0.27	0.00
膀胱						
DSC	0.77±0.10	0.83±0.07	0.85±0.09	0.84±0.10	0.85±0.09	0.33
SI	0.88±0.11	0.95±0.03	0.95±0.03	0.95±0.03	0.94±0.03	*△○□
DC/cm	1.07±0.60	0.60±0.35	0.61±0.58	0.75±0.57	0.70±0.58	0.31
HD/cm	3.60±1.51	2.92±1.17	2.87±1.39	3.13±1.70	2.94±1.49	0.80
JAC	0.64±0.14	0.72±0.11	0.74±0.12	0.73±0.13	0.74±0.13	0.30
直肠						
DSC	0.53±0.07	0.53±0.08	0.52±0.07	0.51±0.09	0.51±0.11	0.97
SI	0.54±0.12	0.52±0.09	0.48±0.10	0.46±0.11	0.46±0.13	0.41
DC/cm	1.65±0.55	1.58±0.75	1.69±0.76	1.71±0.81	1.74±0.81	0.99
HD/cm	3.83±1.10	3.54±0.89	3.75±0.67	3.55±0.72	3.64±0.64	0.92
JAC	0.36±0.06	0.37±0.08	0.35±0.06	0.35±0.08	0.35±0.10	0.98
左侧股骨头						
DSC	0.82±0.06	0.86±0.04	0.87±0.06	0.88±0.03	0.88±0.02	*△○□
SI	0.83±0.10	0.86±0.09	0.87±0.10	0.87±0.06	0.88±0.05	0.63
DC/cm	0.30±0.20	0.24±0.13	0.21±0.18	0.19±0.11	0.18±0.10	0.40
HD/cm	1.17±0.27	0.98±0.33	0.79±0.27	0.80±0.16	0.80±0.13	*△○□
JAC	0.70±0.08	0.75±0.06	0.77±0.09	0.78±0.04	0.79±0.03	*△○□
右侧股骨头						
DSC	0.85±0.05	0.85±0.03	0.86±0.05	0.87±0.04	0.87±0.03	0.53
SI	0.88±0.07	0.88±0.07	0.89±0.09	0.90±0.07	0.90±0.06	0.90
DC/cm	0.25±0.17	0.26±0.18	0.25±0.16	0.24±0.15	0.25±0.13	1.00
HD/cm	1.10±0.34	1.05±0.32	0.92±0.30	0.87±0.25	0.84±0.28	0.23
JAC	0.74±0.07	0.74±0.05	0.76±0.07	0.77±0.05	0.78±0.05	0.49

DSC: Dice 相似性系数; SI: 敏感性指数; DC: 质心偏差; HD: Hausdorff 距离; JAC: Jaccard 系数; 各个符号代表不同组之间具有统计学差异 (*P*<0.05): *表示 V_{AC-MV-1} 与 V_{AC-MV-3} 之间具有统计学差异; △表示 V_{AC-MV-1} 与 V_{AC-MV-5} 之间具有统计学差异; ○表示 V_{AC-MV-1} 与 V_{AC-MV-7} 之间具有统计学差异; □表示 V_{AC-MV-1} 与 V_{AC-MV-9} 之间具有统计学差异

2.2 STAPLE 算法勾画结果

采用STAPLE算法时,勾画结果如表2所示。自动勾画所需时间随匹配数目的增加亦呈线性增加。对于膀胱,仅SI显示匹配数为1时与其他4组有显著性差异,其余各参数均值显示匹配数为3时勾画结果达到最优,当匹配数继续增加时各参数均值有略微变差趋势。对于直肠,SI显示当匹配数为1和3时分别与5、7、9有显著性差异,DSC、SI、JAC的均值随匹

配数的增加而增大,HD的均值随匹配数的增加而减小。对于左侧股骨头,DSC、SI、HD、JAC均显示匹配数为1时与其他4组有显著性差异,匹配数为3时SI与匹配数为5、7、9有统计学差异,DC的均值随匹配数的增加而减小。对于右侧股骨头,SI显示匹配数为1、3的结果分别与5、7、9有显著性差异,其余各参数均值基本一致。

表2 不同匹配数自动勾画危及器官的参数结果(STAPLE算法)($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Results of auto-segmentation of organs-at-risk by different matching numbers (STAPLE algorithm)

(Mean \pm SD)

参数	V _{AC-STAPLE-1}	V _{AC-STAPLE-3}	V _{AC-STAPLE-5}	V _{AC-STAPLE-7}	V _{AC-STAPLE-9}	P值
时间/min	0.96±0.07	1.90±0.11	2.93±0.14	3.94±0.28	5.00±0.27	0.00
膀胱						
DSC	0.76±0.10	0.83±0.08	0.80±0.14	0.78±0.15	0.79±0.15	0.82
SI	0.89±0.11	0.95±0.03	0.96±0.03	0.97±0.03	0.97±0.02	*△○□
DC/cm	1.10±0.56	0.61±0.36	0.83±0.80	0.98±0.80	0.94±0.84	0.60
HD/cm	3.67±1.43	2.93±1.18	3.49±1.89	3.63±1.88	3.68±1.98	0.84
JAC	0.63±0.13	0.72±0.11	0.69±0.17	0.66±0.18	0.67±0.19	0.79
直肠						
DSC	0.51±0.05	0.52±0.09	0.56±0.06	0.57±0.08	0.57±0.07	0.28
SI	0.52±0.12	0.53±0.09	0.66±0.10	0.65±0.09	0.71±0.08	△○□#^!
DC/cm	1.64±0.55	1.61±0.84	1.61±0.69	1.66±0.67	1.63±0.66	1.00
HD/cm	3.81±1.10	3.60±0.95	3.49±0.58	3.14±0.47	3.27±0.67	0.35
JAC	0.35±0.04	0.36±0.08	0.39±0.06	0.40±0.08	0.40±0.07	0.29
左侧股骨头						
DSC	0.81±0.06	0.86±0.04	0.87±0.03	0.87±0.03	0.86±0.04	*△○□
SI	0.81±0.09	0.88±0.09	0.95±0.03	0.96±0.02	0.96±0.02	*△○□#^!
DC/cm	0.31±0.19	0.22±0.14	0.18±0.11	0.17±0.11	0.18±0.12	0.12
HD/cm	1.25±0.28	0.96±0.34	0.88±0.23	0.90±0.33	0.93±0.29	*△○□
JAC	0.68±0.08	0.75±0.06	0.77±0.05	0.76±0.04	0.76±0.05	*△○□
右侧股骨头						
DSC	0.85±0.05	0.85±0.03	0.85±0.04	0.85±0.04	0.84±0.04	0.99
SI	0.88±0.07	0.90±0.07	0.95±0.04	0.97±0.03	0.96±0.03	△○□#^!
DC/cm	0.24±0.17	0.26±0.18	0.27±0.16	0.27±0.17	0.28±0.16	0.99
HD/cm	1.12±0.34	1.10±0.33	1.12±0.39	1.23±0.34	1.2±0.32	0.89
JAC	0.74±0.07	0.74±0.05	0.73±0.06	0.74±0.05	0.73±0.06	0.99

各个符号代表了不同组之间具有统计学差异($P<0.05$):*表示V_{AC-STAPLE-1}与V_{AC-STAPLE-3}之间具有统计学差异;△表示V_{AC-STAPLE-1}与V_{AC-STAPLE-5}之间具有统计学差异;○表示V_{AC-STAPLE-1}与V_{AC-STAPLE-7}之间具有统计学差异;□表示V_{AC-STAPLE-1}与V_{AC-STAPLE-9}之间具有统计学差异;#表示V_{AC-STAPLE-3}与V_{AC-STAPLE-5}之间具有统计学差异;^表示V_{AC-STAPLE-3}与V_{AC-STAPLE-7}之间具有统计学差异;!表示V_{AC-STAPLE-3}与V_{AC-STAPLE-9}之间具有统计学差异

2.3 多数投票算法和 STAPLE 算法的勾画结果比较

多数投票算法和 STAPLE 算法的勾画结果(匹配数为 3)示意图如图 1 所示,统计学分析结果如表 3 所示。各危及器官的勾画结果参数显示仅双侧股骨头的 SI 有显著性差异,左侧股骨头 $V_{AC-MV-3}$ vs $V_{AC-STAPLE-3}$ 为

(0.86 ± 0.09) vs (0.88 ± 0.09), 右侧股骨头 $V_{AC-MV-3}$ vs $V_{AC-STAPLE-3}$ 为(0.88 ± 0.07) vs (0.90 ± 0.07), STAPLE 算法相比多数选择算法的勾画结果更接近于手动勾画。其他参数均值基本一致,均无统计学差异,勾画算法的选择不影响自动勾画所需时间。

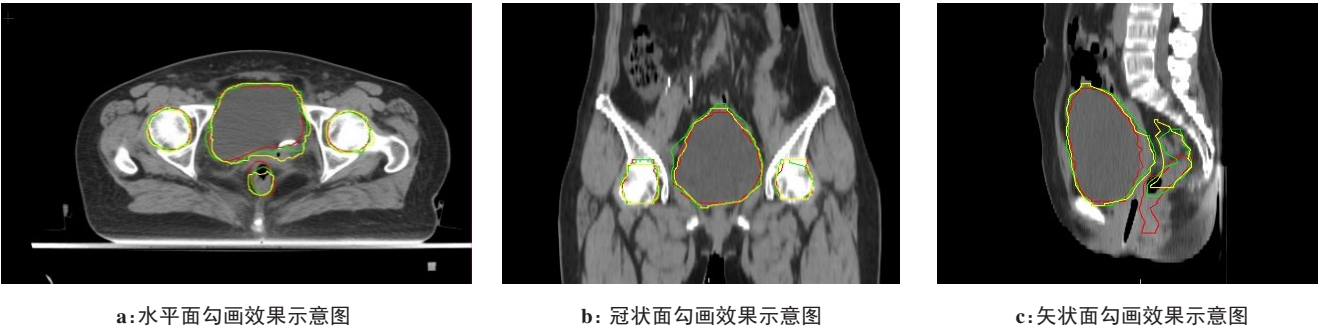


图 1 不同算法勾画结果示意图
Fig.1 Schematic diagrams of segmentation results obtained by different algorithms

匹配数目为 3,其中红色为参考勾画,绿色为多数投票算法结果,黄色为 STAPLE 算法结果

表 3 多数投票算法和 STAPLE 算法勾画结果(匹配数为 3)的统计学分析
Tab.3 Statistical analysis on segmentation results obtained by majority vote algorithm and STAPLE algorithm (match number of 3)

危及器官	P 值					时间
	DSC	SI	DC	HD	JAC	
膀胱	0.17	0.06	0.08	0.77	0.47	0.34
直肠	0.41	0.85	0.41	0.40	0.43	
左股骨头	0.34	0.01	0.22	0.29	0.64	
右股骨头	0.08	0.00	0.35	0.39	0.10	

3 讨论

自动勾画软件在放射治疗进程中扮演重要的角色,对于医生来说是一种极其有效的工具,除了节省时间、提高工作效率,同时也能改善勾画者差异性,如何提高自动勾画精度、勾画精确性的影响因素、图谱库的建立方式、剂量学评估^[12]等一直是研究者们所探寻的方向,涉及到的病例也颇为广泛,包括鼻咽癌^[13-14]、乳腺癌^[15-16]、宫颈癌^[17]、食管癌^[18]、胸部危及器官^[19]等。研究结果表明自动勾画软件的使用在临床应用中可以大量节约时间和资源,多模板的勾画方式优于单模板且更适用于临床,但是仍无法直接满足临床需求,需经过一定的手工修正后才能满足临床需要,自动勾画结果和手动勾画结果在剂量上有较强的关联性,但是自动分割危及器官的质量不能仅通过几何参数来验证和说明。

在本研究中,笔者研究了勾画算法及匹配数目

在基于 Atlas 实施宫颈癌危及器官自动勾画时对自动勾画结果的影响,研究结果显示在应用 MIM 软件进行自动勾画时,自动勾画所需时间随匹配数目的增加呈线性增加,但仍小于手动勾画时间,一定程度上能够提高勾画效率。

选择多数投票算法进行自动勾画时,膀胱的自动勾画结果显示,当匹配数为 1 时,勾画结果最差,随着匹配数的增加,勾画结果较稳定,均优于匹配数为 1 时的勾画结果;对于直肠,各评价参数结果均较差,除 SI 外其他参数的均值均显示匹配数为 3 时,勾画结果最佳;对于股骨头,各匹配数勾画结果均较好,且随着匹配数的增加,勾画结果有变优的趋势。

选择 STAPLE 算法进行自动勾画时,匹配数为 3 时膀胱的勾画结果最好;随匹配数的增加,直肠的勾画结果趋于变好;对于左侧股骨头,匹配数为 1 时最差,匹配数为 3 时次之,匹配数为 5、7、9 时较好,且各组勾画结果均在较高的水平;对于右侧股骨头,各组勾画结果差异不大。

将两种勾画算法的结果进行比较时发现,匹配数相同的勾画时间基本相同,勾画时间只受匹配数大小的影响;各器官勾画结果显示,仅双侧股骨头的 SI 有统计学差异,说明 STAPLE 算法对于股骨头的勾画更加接近于手动勾画,但其他评价参数均值基本一致,表明两组勾画算法的结果基本相同。

综上所述,两种勾画算法的勾画结果无较大差异;选择除 1 之外的另外 4 种匹配数均可得到较好的结果,但在时间上,匹配数为 9 时[(4.97 ± 0.27) min]

所需勾画时间是匹配数为3时 $[(1.89\pm 0.09)\text{ min}]$ 的2.6倍,因此建议匹配数为3就基本能满足临床勾画需求。

在文献调研中笔者还发现,影响自动勾画精确性还有诸多其他因素,比如身高、体质量、体表面积、器官体积以及在头部危及器官的勾画中头的直径、颈部直径等^[20],对于自动勾画的更多影响因素以及更多部位的临床应用需要进一步的研究,使得自动勾画工具更好地应用于临床。

【参考文献】

- [1] GEETS X, DAISNE J F, ARCANGELI S, et al. Inter-observer variability in the delineation of pharyngo-laryngeal tumor, parotid glands and cervical spinal cord: comparison between CT-scan and MRI [J]. *Radiother Oncol*, 2005, 77(1): 25-31.
- [2] YOUNG A V, WORTHAM A, WERNICK I, et al. Atlas-based segmentation improves consistency and decreases time required for contouring postoperative endometrial cancer nodal volumes[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 79(3): 943-947.
- [3] BELL L R, DOWLING J A, POGSON E M, et al. Atlas-based segmentation technique incorporating inter-observer delineation uncertainty for whole breast[J]. *J Phys Conf Ser*, 2017, 777(1): 012002.
- [4] SPEIGHT R, PRESTWICH R, SEN M, et al. Assessing the accuracy of atlas-based automatic segmentation of volumes for adaptive treatment in the head and neck[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(3): S788-S789.
- [5] TAO C J, YI J L, CHEN N Y, et al. Multi-subject atlas-based auto-segmentation reduces interobserver variation and improves dosimetric parameter consistency for organs at risk in nasopharyngeal carcinoma: a multi-institution clinical study[J]. *Radiother Oncol*, 2015, 115(3): 407-411.
- [6] KLEIN S, VAN DER H, LIPS I M, et al. Automatic segmentation of the prostate in 3D MR images by atlas matching using localized mutual information[J]. *Med Phys*, 2008, 35(4): 1407-1417.
- [7] WARFIELD S K, ZOU K H, WELLS W M. Simultaneous truth and performance level estimation (STAPLE): an algorithm for the validation of image segmentation[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2004, 23(7): 903-921.
- [8] DICE L R. Measures of the amount of ecologic association between species[J]. *Ecology*, 1945, 26(3): 297-302.
- [9] TSUJI S Y, HWANG A, WEINBERG V, et al. Dosimetric evaluation of automatic segmentation for adaptive IMRT for head-and-neck cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 77(3): 707-714.
- [10] JACCARD P. The distribution of the flora in the alpine zone. I[J]. *New Phytol*, 1901, 11(2): 37-50.
- [11] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLIDGE W A. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. *IEEE Trans Pattern Anal*, 1993, 15(9): 850-863.
- [12] 蒋璠, 吴昊, 张健, 等. 基于最优自动勾画的放疗计划剂量学评估[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(4): 423-428.
JIANG F, WU H, ZHANG J, et al. A dosimetric evaluation of treatment planning based on optimal auto-segmentation [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2017, 26(4): 423-428.
- [13] 谷珊珊, 田娟秀, 王运来, 等. 基于MIM软件模板数据库的病例数对危及器官自动勾画的探讨[J]. *中国医学装备*, 2018, 15(3): 1-4.
GU S S, TIAN J X, WANG Y L, et al. Exploration for automatically delineation of organ at risk based on medical case number of template database in MIM software[J]. *China Medical Equipment*, 2018, 15(3): 1-4.
- [14] GRESSWELL S, RENZ P, WERTS D, et al. (P059) impact of increasing atlas size on accuracy of an atlas-based auto-segmentation program (ABAS) for organs-at-risk (OARS) in head and neck (H & N) cancer patients[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2017, 98(2): E31.
- [15] CIARDO D, GERARDI M A, VIGORITO S, et al. Atlas-based segmentation in breast cancer radiotherapy: evaluation of specific and generic-purpose atlases[J]. *Breast*, 2017, 32: 44.
- [16] KADERKA R, GILLESPIE E F, MUNDT R C, et al. Geometric and dosimetric evaluation of atlas based auto-segmentation of cardiac structures in breast cancer patients[J]. *Radiother Oncol*, 2019, 131: 215-220.
- [17] 孙宇晨, 张晓智, 李毅. 自动轮廓勾画软件构建图谱库在宫颈癌放疗中应用探讨[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(10): 1167-1172.
SUN Y C, ZHANG X Z, LI Y. Clinical feasibility of atlas-based auto-segmentation software in radiotherapy for cervical cancer[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2017, 26(10): 1167-1172.
- [18] 林小艺. 基于图谱库的ABAS自动轮廓勾画软件在食管癌中的应用[D]. 福州: 福建医科大学, 2016.
LIN X Y. Application of atlas-based autosegmentation software in esophageal cancer[D]. Fuzhou: Fujian Medical University, 2016.
- [19] 余元祥, 林柏翰, 陈创珍, 等. 基于ABAS软件胸部放疗危及器官自动勾画图像集的建立与应用[J]. *广东医学*, 2018, 39(11): 1698-1700.
YU Y X, LIN B H, CHEN C Z, et al. Establishment and application of auto-segmentation image set based on ABAS software for chest radiotherapy[J]. *Guangdong Medical Journal*, 2018, 39(11): 1698-1700.
- [20] 胡江, 王明理, 徐林, 等. 头颈部肿瘤放疗单模板自动轮廓勾画软件的应用[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2015, 22(8): 618-622.
HU J, WANG M L, XU L, et al. Application of single-template atlas-based auto-segmentation in head and neck carcinoma[J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention & Treatment*, 2015, 22(8): 618-622.

(编辑:陈丽霞)