

一种射野图像和参考图像的自动配准方法

郑亚琴¹, 田 心² (1.山西省肿瘤医院 放疗技术中心, 山西 太原 030013; 2.天津医科大学 生物医学工程系, 天津 300070)

摘要:目的: 及时纠正放射治疗过程中患者的摆位误差, 提高放射治疗效果。方法: 本文对放疗中射野图像和参考图像的配准, 应用 Canny 算子进行两幅图像的边缘提取, 将提取的图像边缘作为配准的基准点, 以射野图像与参考图像的最大互信息为配准准则, 应用模拟退火法优化配准参数, 搜索图像最大互信息。结果: 本文对 29 例宫颈癌和前列腺癌患者的射野图像与参考图像进行了配准, 结果表明该方法配准精度高, 提高了配准的速度。结论: 该配准方法适用于放疗临床摆位误差的在线分析。

关键词: 放射治疗; 射野图像; 参考图像; 摆位误差; 配准

中图分类号: R322

文献标识码: A

文章编号: 1005-202X(2009)06-1481-04

Automatic Registration between Portal Images and Reference Images in Radiotherapy

ZHENG Ya-qin¹, TIAN Xin²

(1.Department of Radiation Oncology, Shanxi province tumor hospital, Taiyuan Shanxi 030013, China; 2.Department of Biomedical Engineering, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China)

Abstract: Objective: To correct the set-up error of patients during radiotherapy is very important for increasing treatment effective. **Methods:** This paper proposes a registration method based on portal images and reference images. Canny Operator was used to extract edge features. The extracted edge features were set as datum mark to calculate the maximal mutual information between the portal images and reference images. Parameters were optimized with simplex-simulated annealing optimization strategy. **Results:** The portal images and reference images of 29 patients with the cervix cancer and prostatic carcinoma were registered in this paper. The results showed that the registration was precise, and the registration speed was increased remarkably. **Conclusion:** So this registration method can be applied for online estimation for set-up errors in clinical radiation.

Key words: radiotherapy; portal image; reference image; set-up errors; registration

前言

放射治疗中, 目前常用的摆位误差验证方法是通过比较射野图像和参考图像上的内部解剖标记点来分析摆位误差。由于该方法是通过人工选取解剖标记点, 配准时间长, 不利于实时的摆位误差分析。

国内外有大量对放疗摆位误差的研究^[1-3]。在所有应用于摆位误差分析的配准方法中。互信息配准法在图像自动配准方法中精度较高, 但由于射野图像与参考图像都较大, 如果对整幅图像进行互信息配准, 需耗费大量的时间, 很难实现治疗过程中摆位误差的在

线检测。

基于摆位误差分析的要求及各种配准方法的特点, 本文提出一种射野图像与参考图像的自动配准方法。下面我们对该方法进行详细介绍。

1 应用 Canny 算子对图像进行边缘提取

由于射野图像的信噪比低、对比差、清晰度低, 而且分布有不均匀的噪声, 这些图像质量问题, 影响了对射野图像的分析, 使得一些微小的结构分辨不出来, 难以寻找解剖标记点。针对待配准图像的特征, 我们先对图像进行灰度变换突出感兴趣区, 再进行中值滤波去除噪声^[4]。应用 Canny 算子^[5]对经过预处理的射野图像和参考图像进行边缘特征提取。

2 基于边缘的互信息配准的目标函数

设两幅待配准的图像为 F 、 R , F 为浮动图像, R 为

收稿日期: 2009-05-26

作者简介: 郑亚琴(1977-), 女, 山西省肿瘤医院放疗技术中心, 从事肿瘤放射物理工作。E-mail: xiaoya96@sohu.com。

参考图像。本文将 EPID (electronic portal imaging device) 产生的射野图像作为浮动图像, 将在治疗计划系统中产生的数字重建射野图像 DRR (digitally reconstructed radiographs) 作为参考图像。

设两幅图像中提取的边缘特征点集合分别为 $X = \{x_i, i=1, 2, \dots, N_1\}$ 和 $Y = \{y_j, j=1, 2, \dots, N_2\}$ 。定义两个点集之间联合分布概率匹配矩阵为 p_{ij} , 其中概率分布 p_{ij} 表示同时从 x 中选取 x_i 和从 y 中选取 y_j 的概率, 表示 x_i 与 y_j 相匹配的程度, p_{ij} 大表示 x_i 与 y_j 之间匹配的程度较高反之匹配程度较小。同样, 对于边缘概率

$$p_i = \sum_j p_{ij}$$

表示点集 X 中的点 x_i 与特征点集 Y 中的所有点的匹配程度, 如果 p_i 较小, 说明 x_i 是一个出界点。

设以上两个点集之间的空间变换为 T 。即:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 t_x, t_y 为空间变换 T 的平移量, θ 为空间变换 T 的旋转角度, s 为空间变换 T 的比例因子。

在空间变换 T 下, 定义点集 X 和 Y 的互信息为:

$$MI(X, Y) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_1} p_{kj} \sum_{l=1}^{N_2} p_{il}} \quad (2)$$

其中 $p_i = \sum_{j=1}^{N_2} p_{ij}$, $p_j = \sum_{i=1}^{N_1} p_{ij}$ 。

这两个特征点集之间的距离测度为

$$d_{ij}(T) = \|X_i - T_{y_j}\|^2 \quad (3)$$

采用最大熵原理, 将点集之间的匹配转化为式(4)的约束优化问题:

$$\begin{cases} \max H = - \sum_{i,j} p_{ij} \log p_{ij} \\ s.t. E(p, T) = d \\ \sum_{i,j} p_{ij} = 1 \\ p_{ij} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

d 表示匹配误差和出界点引起的误差。

应用 Lagrange 乘子, 将式(4)的约束优化转化为目标函数:

$$E_{ME}(p, T, \alpha, \lambda) = \alpha \left(\sum_{i,j} p_{ij} d_{ij}(T) - d \right) + \lambda \left(\sum_{i,j} p_{ij} - 1 \right) + \sum_{i,j} p_{ij} \log p_{ij} \quad (5)$$

将式(2)的互信息测度加入到目标函数中, 可得到新的目标函数:

$$E_{MEI}(p, T, \alpha, \lambda) = \alpha \left(\sum_{i,j} p_{ij} d_{ij}(T) - d \right) + \lambda \left(\sum_{i,j} p_{ij} - 1 \right) + \sum_{i,j} p_{ij} \log p_{ij} - k MI(p) \quad (6)$$

应用模拟退火算法^[6]使目标函数最小, 求出最优的空间变换参数。

3 优化配准参数

为求取最优空间变换参数。本文采用了增加了记忆功能的模拟退火算法^[7]。避免了求目标函数的偏导数及解大型矩阵方程组的问题, 并且对初始点的选取要求低, 不宜落入局部极值, 也有利于提高配准精度。具体方法为:

(1) 根据经验给出某个具体参数的取值范围。如果对使目标函数达到极小的状态参数进行任意取值, 不对其上下限进行约束, 会使计算过程非常缓慢。考虑到临床实际摆位中的应用, 本文中共设有 4 个参数, 水平方向的平移参数 x 、垂直方向的平移参数 y 、旋转角度 θ 、缩放比例 s , 在实际治疗执行过程中, 各个参数的偏差范围都不是很大(太大的偏差在治疗前就能得到及时修正), 变换参数的选取范围为 $\Delta x = \epsilon \{-10, 10\}$, $\Delta y = \epsilon \{-10, 10\}$, $\Delta \theta = \epsilon \{-5, 5\}$, $\Delta s = \epsilon \{0.5, 1.5\}$ 。

(2) 在随机搜索过程中, 会出现使目标函数值小于某一精度的状态参数。在这种情况下, 跳出内循环进行提前降温, 且以该状态参数值作为降温后的搜索初值。

4 临床射野图像和参考图像的配准

4.1 图像采集

在临床中采集了 29 对宫颈癌和前列腺癌患者的骨盆部图像, 每一对图像为同一患者在治疗计划系统中产生的 DRR 图像和在治疗摆位时拍摄的 EPID 射野图像。DRR 图像由 Nucletron 的 plato 治疗计划系统产生, EPID 射野图像由 SIEMENS-ONCOR 加速器产生。图像的大小统一设定为: DRR 图像 150×182, 射野图像 147×172。配准在同一台 PC 机上完成。编程语言为 matlab6.5。图 1 为一例前列腺癌患者的 EPID 射野图像和 DRR 图像。

4.2 方法

由于射野图像和 DRR 图像是在不同的时间和空间获得, 造成配准结果的评估很困难。借鉴 Stoeckel 等的方法^[8], 在本文中, 我们请两位有经验的物理师采用人机结合的方式对采集的 29 组图像进行人工配准, 将获取的配准参数的均值定为“金标准”。对 29 组

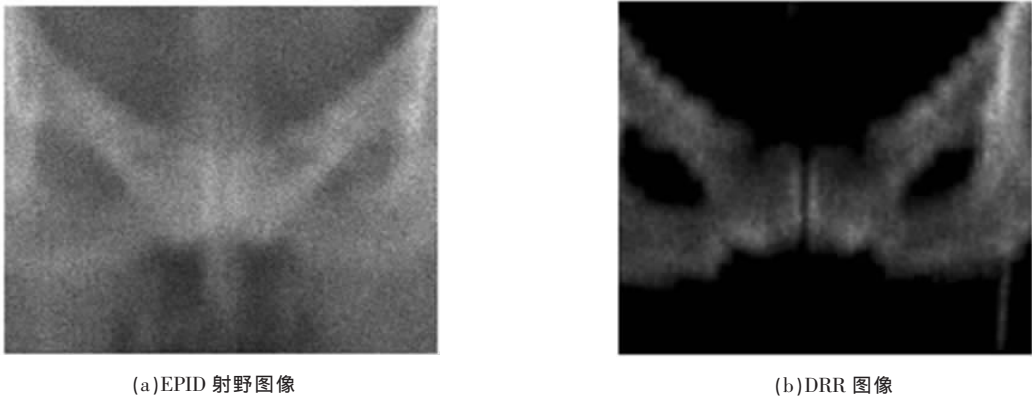


图 1 一例前列腺癌患者治疗时的 EPID 射野图像和计划时的 DRR 图像
Fig.1 The portal image and DRR images of a patient with prostatic carcinoma

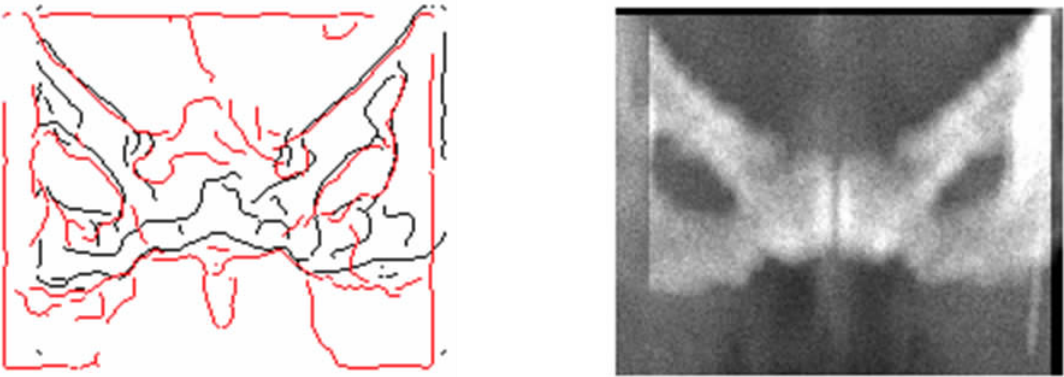


图 2 对图 1 中的两幅图像边缘的配准结果
Fig.2 The registration result of two extracted edge features in figure 1

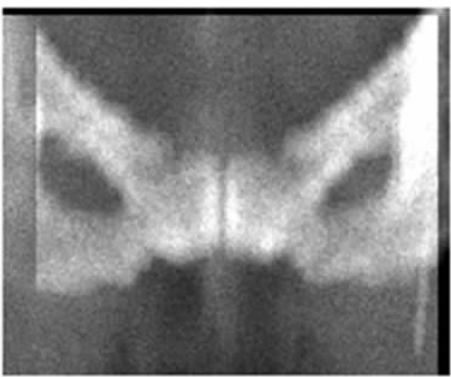


图 3 对图 1 中的两幅图像的配准结果
Fig.3 The registration result of two images in figure 1

表 1 29 例骨盆部射野图像和参考图像的配准结果

Tab.1 The registration results of the portal images and reference images of 29 patients

配准参数	配准方法	配准误差均值	配准最大误差	配准误差标准差
水平位移(pix)	基于特征的互信息	1.1830	1.2950	0.0992
	基于灰度的互信息	0.9857	1.306	0.0781
垂直位移(pix)	基于特征的互信息	1.2690	1.5878	0.1019
	基于灰度的互信息	1.1742	1.493	0.0816
旋转角度(度)	基于特征的互信息	0.5144	1.0462	0.0218
	基于灰度的互信息	0.4623	1.0716	0.0313
缩放比例	基于特征的互信息	0.0135	0.0321	0.0114
	基于灰度的互信息	0.0185	0.0620	0.0235

图像分别应用本文提到的基于边缘的互信息配准方法与目前常用的基于灰度的互信息配准法进行配准。配准结果与设定的“金标准”相比较。

4.3 结果

表 1 为对 29 组图像分别应用基于边缘的互信息配准方法与基于灰度的互信息配准法进行配准的结果。图 2 和图 3 分别为一例前列腺癌患者治疗时的 EPID 射野图像和计划时的 DRR 图像配准效果图。

在摆位误差分析中,配准的时间直接关系到摆位

表 2 两种配准方法配准时间的比较结果

Tab.2 The compration results of the registration time with two methods

配准方法	平均配准时间 (s)
基于灰度的互信息配准	381
基于特征的互信息配准	153

误差的纠正能否进行。如果配准的时间太长,就会延长患者的治疗过程。表 2 为对 29 组图像分别应用两种配准方法进行配准所用的平均时间。

5 结论与讨论

本文提出的配准方法在配准精度接近于基于灰度互信息的配准,配准效果比较理想,能满足临床的需要。该算法的优点是将边缘作为图像的共同特征,所用的空间变换和互信息计算是对提取的边缘特征坐标直接进行的,与灰度互信息相比具有计算量小的特点,缩短了配准所用的时间。且对硬件的要求较低,适用对放疗摆位误差实时分析。

该方法也存在一些不足之处,还需要进行以下改进:

(1)同一组图像中边缘特征提取的结果影响了配准精度。图像的边缘提取是本算法中的关键。需研究一种抗噪性较好的边缘提取算法,来提高配准的精度。

(2)由于 EPID 只提供二维的几何参数,而患者的体位和方向都是三维的概念,本文中的配准算法均针对二维图像进行设计,为纠正三维方向的误差,摆位分析时采用的是对两幅正交图像分别进行配准。在我们今后的研究中,可尝试采用先对射野图像进行三维重建,之后与三维重建后 CT 图像进行配准,研究一种 3D/3D 的配准算法,从根本上纠正三维方向的误差。

(3)只能配准骨性标记明显的图像,如头部和盆部,对于比较模糊的胸部图像误配率较高。在今后有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Ali K, Peter B, Wolfgang W, et al. Automatic registration of portal images and volumetric CT for patient positioning in radiation therapy[J]. Medical image analysis, 2006,10: 96-112.
- [2] Munbodr R, Chen Z, Jaffray DA, et al. Automated 2D-3D registration of portal images and CT data using line-segment enhancement[J]. Med Phys, 2008, 35(10): 4352-61.
- [3] Ruchala K J, Olivera G H, Kapatoes J M. Limited-data image registration for radiotherapy positioning and verification[J]. Radiation oncology Biol.Phys, 2002, 54(2): 592-605.
- [4] Arec G R, Foster R E. Detail preserving ranked-order based filters for image processing [J]. IEEE Trans. Accost. Speech. Signal Processing, 1987, 37(7): 83-98.
- [5] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8 (6): 679-698.
- [6] Kirkpatrick S, Gelat Jr CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220: 671-680.
- [7] 付宇光, 唐焕文, 计明军, 等. 模拟退火算法在图像配准中的应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2004, 23(5): 405-409.
- [8] Vos F M, Stoeckel J, Vos P H, et al. Evaluation of an automatic system for simulator/portal image matching[J]. MICCAI 2000: 442-451.

(上接第 1473 页)

研究对象中有两例术后肺内留有银甲患者,平静呼气相观测银甲均随双手握杆位置变动不同程度的偏离中心位置。图 1 显示在其它条件完全不变时,将双手握杆位置由交叉 A 位变为同侧 C 位时,银甲偏离等中心的情况。

当前,国内还有很多放疗机构采用塑形膜配合 MED-TEC 等厂家生产体架固定胸部肿瘤,因该类体架没有设计手握杆,应嘱病人记住制作体模时双手抱头位置,在扫描定位 CT 和以后的验证及每次治疗时应尽量重复其位置。对于使用真空袋体架应书面记录其双手握杆位置,并尽可能用真空袋对上臂予以塑形固定。本研究提示有必要对目前市场上出售的真空袋做一些改进,如在头端应设计宽大一些,便于塑形固定肩部及臂部以减少上肢位置变化对胸骨皮肤及肺

的牵拉影响。

参考文献:

- [1] 钟亚华, 周云峰, 谢丛华, 等. 真空成型袋在盆腔野放射治疗中的价值[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2002, 11: 240-242.
- [2] 李承军, 徐利明, 马广栋. 双下肢辅助标记在立体定向体架固定盆腔肿瘤病人中的应用[J]. 肿瘤学杂志, 2009, 15: 256-257.
- [3] 周桂娥. 利用乳腺托架进行乳腺癌等中心 1/4 切线野放射治疗及摆位技术[J]. 实用医技杂志, 2007, 32: 49-50.
- [4] Kinzie, J.J, G.E.Hanks, C.J.MacLean, et al. Patterns of care study: Hodgkin's disease relapse rates and adequacy of portals [J]. Cancer, 1983, 5: 2223-2226.
- [5] White, J.E, T.Chen, J.McCracken, et al. The influence of radiation therapy quality control on survival, response and sites of relapse in oat cell carcinoma of the lung: preliminary report of a Southwest Oncology Group study [J]. Cancer, 1982, 50: 1084-1090.