

基于 Legendre 正交矩的配准方法在 放疗导航中的应用研究

葛 云, 章 东

(南京大学电子科学与工程系, 江苏南京 210093)

摘 要: 放疗导航在放射治疗的摆位精度、实时性、数字化中有着重要的应用前景, 而精确配准是实施放疗导航的前提. 本文提出一种基于 Legendre 矩的快速配准方法, 用于放疗导航的红外实时跟踪. 文中首先介绍了该方法的实现步骤; 然后将该方法与传统松弛法进行了模拟计算和实验比较, 新方法在降低误识别率及避免病态方程方面, 具有明显的优越性; 最后将该方法应用于临床放疗导航系统中, 在精确度和实时性方面取得了满意的临床应用结果.

关键词: Legendre 矩; 图象配准; 图象引导放疗; 实时跟踪

中图分类号: TP391. 41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 07-1529-03

A Fast Matching Way Using the Legendre Orthogonal Moment and Application in Image Guided Radiotherapy

GE Yun, ZHANG Dong

(Department of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Image guided radiotherapy (IGRT) has a wide application in numeric radiotherapy with high locating accuracy and real time track. Exact matching is the precondition of IGRT. This paper presents a new way of fast registration using the Legendre moment, and monitoring the patient in real time by detecting and tracking infrared markers. Firstly, the steps of the new way are introduced. Secondly, compared to the traditional means about relaxation, the new way has obvious advantages in reducing misidentification ratio and escaping ill conditioned equations. Lastly, the effectiveness about accuracy and real time track, have been testified in clinic application using the new way.

Key words: Legendre moment; image matching; image guided radiotherapy; real time track

1 引言

肿瘤病人放疗效果的好坏, 直接取决于放疗定位的精度. 而放疗导航可以实现放疗的实时自动化精确定位, 近年来刚刚在国内起步. 原理主要利用红外探测器和固定在皮肤上的红外标记形成反馈系统, 通过红外标记, 将扫描获得的图像空间和现实空间进行配准, 利用虚拟现实技术, 实现病人的自动摆位, 同时可对治疗中的病人肿瘤进行实时监控.

Lawrence T. Wang^[1] 利用红外定位点匹配技术, 在临床上进行了测试研究, 和传统的定位技术相比, 它大大地提高了定位的精度; Sanford L.^[2] 利用物理测试的方法证明了, 红外跟踪不但在治疗精度上大大提高, 更加在实时性和误差校正上独具优势. Dirk Verellen^[3] 在文章中提出了红外跟踪和 X 光有机结合提高腹部肿瘤定

位精度的研究结果.

自 HU^[4] 提出矩的理论及应用以来, 矩的研究在图象配准、模式识别等许多领域取得了很大的发展. Legendre 矩具有正交性、无冗余性等优点, 其快速算法^[5,6] 在点数不多、干扰不大的情况下, 已经完全能够满足临床使用的速度要求.

本文首次利用 Legendre 矩, 在红外跟踪中实现快速配准, 和现常用的基于点匹配方法相比, 配准更加快速、准确, 大大地提高了放疗系统的定位精度; 同时还解决了传统点匹配带来的病态方程问题, 系统更加稳健, 从而大大地加强了系统的稳定性.

2 传统的点匹配配准方法

2.1 传统点匹配方法

点匹配方法, 一般通过 SVD 分解求解空间刚性转

换矩阵. 该方法在运算速度上面具有相当优势, 但因为是根据匹配结果计算的空间转换矩阵, 所以在系统的抗干扰和稳定性上面比较弱.

Sanjay Ranade^[7]采用基于松弛法的传统点集匹配方法. 它对可能的映射点对, 计算吻合度确定一个相似性测量度, 并通过其余映射点对与该相似测量值发生作用, 对该相似值进行迭代, 直到对某一点除最可能的映射点对以外其他映射点对的相似度均小于一个预设的阈值. 但是该方法在噪声和干扰点较多时效果不理想.

D. J. Kahl^[8]采用边对应关系确定点集间的对应关系, 在这种方法中, 边端点的对应判断有二义性, 且拓扑约束关系不强. 因此用边对应方法势必造成对应表中噪声的增加, 从而影响匹配的效率.

2.2 病态方程的产生

点匹配方法, 肯定会存在病态方程^[9]的问题. 由于放置的红外反射点的几何关系或者观察视觉的方向性等问题, 点匹配方法是很容易造成空间转换矩阵病态问题, 这样会大大地影响配准精度, 造成图象配准的鲁棒性较差. 而在精确放疗中, 任何配准的错误都会造成放疗事故, 在放疗中是绝对不允许的, 必须保证 100% 的配准正确率.

3 Legendre 矩的线性配准方法

3.1 Legendre 正交矩的定义

三维图形 $f(x, y, z)$ 的 Legendre 正交矩的定义:

$$\lambda_{lmn} = \frac{(2l+1)(2m+1)(2n+1)}{8} \cdot \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 P_l P_m P_n f(x, y, z) dx dy dz$$

$f(x, y, z)$ 的坐标取值要求 $x, y, z \leq 1$, 在此范围内 Legendre 矩才具有正交性. 这就需要将图形进行归一化处理.

3.2 Legendre 的快速计算和线性配准方法

直接计算, 计算量是相当庞大的, 文献^[6]介绍了一种基于格林公式和迭代方法的 Legendre 正交矩的快速计算方法. 同时文献^[10, 11]也详述了基于 Legendre 正交矩的线性配准方法, 在对近似刚体图形附加扰动的前提下, 在配准速度和配准性能方面, 仍然取得了满意的结果.

具体实现步骤如下:

(1) 计算质心. 通过放疗计划系统中 CT 扫描图片, 识别得到若干红外标记球三维坐标, 计算以此为顶点产生的参考几何体的质心; 同时通过红外探测器, 实时计算获取 IR 标记球的检测几何体的质心.

(2) 几何体归一化处理. 分别计算参考几何体和检

测几何体的顶点至相应质心的最大距离, 进行归一化处理.

(3) 对准质心, 进行 Legendre 矩快速计算, 计算两几何体的配准参数: 匹配系数^[10].

(4) 再利用由 Nelder 和 Mead^[12]提出的单纯形调优法, 逼近线性转换矩阵最优解.

4 实验及结果讨论

4.1 模拟计算实验设计

在空间内随机生成 N ($N=10$) 点的点集 P , 通过初设的转换 A 得到点集 Q , 并将 Q 中的点重新随机排列. 在 P 中随机删除 $N-m$ 点, 在 Q 中随机删除 $N-n$ 点, 通过重复计算, 统计分析算法的有效性.

表一是基于 Legendre 矩配准方法与松弛法匹配的比较. 由表中数据可以看出, 本文的改进方法明显占优. 后者在多次匹配试验中随着待匹配点集中伪点和漏点数的增加, 误识别点数急剧增加, 识别率大大降低, 计算时间也较长, 而改进方法不仅能保证识别率, 计算时间也较短. 而且改进方法具有很好的鲁棒性能, 且单次计算时间为在毫秒级, 可以满足实时配准的要求.

表 1 基于 Legendre 矩配准方法与松弛法 10000 次模拟结果比较, 两组待匹配的点集各有 10 个点

(m, n)	误识别数(个)		运算时间(秒)	
	Legendre	松弛法	Legendre	松弛法
(9, 9)	0	243	120.6	449.11
(9, 8)	0	502	111.5	391.77
(8, 8)	0	1022	100.2	317.19
(8, 7)	0	2577	78.0	275.97
(7, 7)	0	3608	70.0	237.09
(7, 6)	0	4981	63.4	203.69

4.2 实际应用结果

我们将上述方法, 成功地用于实际的临床使用中, 已经有近 1000 例病人得到使用. 操作简单、直观、可靠. 从中我们选择了两个普通病例加以说明:

图 1(a1) 为一头部肿瘤病人的治疗计划显示, 在断层图象中可以看到跟踪小球的 CT 影像, 在三维显示中, 可以看到红外反射小球的重建立体显示.

图 1(a2) 为头部肿瘤病人刚进入动态跟踪系统监控时, 显示肿瘤中心和加速器等中心的三个方向的坐标偏差, 坐标偏差显示为 $(-46.8, 75.1, 303.9)$, 单位为 mm; 同时也实时地显示了加速器的床、机架、病人、等中心精确配准后的三维动态虚拟场景.

图 1(a3) 为该头部肿瘤病人在摆好位后的监控情况; 界面显示了肿瘤中心和加速器等中心的三个方向的坐标偏差, 坐标偏差为 $(-0.3, -0.0, 0.1)$, 单位为 mm.

图 1(b1) 为一胸部肿瘤病人的治疗计划显示。

图 1(b2) 为胸部肿瘤病人刚进入动态跟踪系统监控时, 显示坐标偏差为 $(-22.1, 36.6, 715.3)$, 单位为 mm。

图 1(b3) 为该胸部肿瘤病人在摆好位后的监控情况。界面显示了肿瘤中心和加速器等中心的三个方向的坐标偏差, 坐标偏差为 $(-0.1, -0.8, -0.1)$, 单位为 mm。

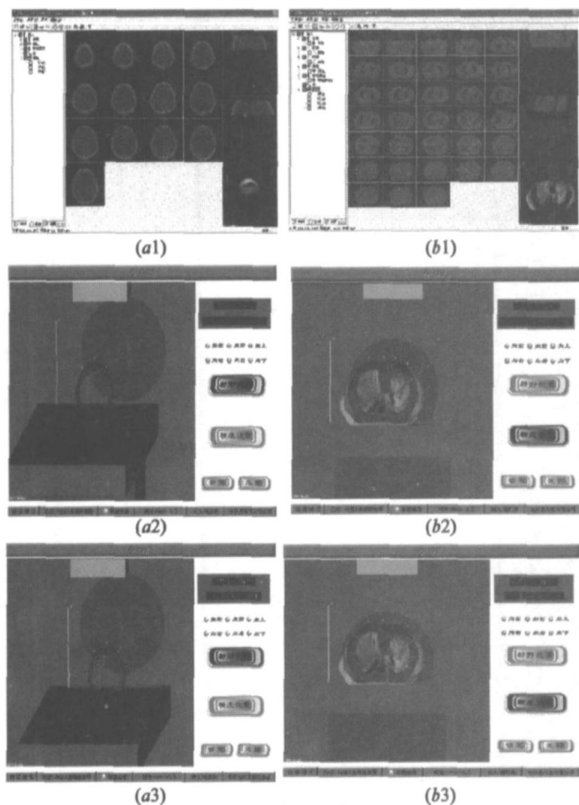


图1

4.3 讨论

通过结果显示, 该方法有效地避免了因病态方程而产生的配准显示“跳动”等错误问题, 比传统的定位方式, 在精确度、实时性、系统误差消除、方便性等方面产生了根本性的变化, 性能也大大提高。

但由于人体是活体, 胸部和腹部肿瘤定位精度, 会随着人体的组织运动产生较大的误差, 这也是世界性难题。由于有了动态跟踪系统, 我们可以精确地在实际场景中, 附加利用超声和 X 光, 实际建立带有三维精确坐标的影像, 实时精确地“抓取”肿瘤中心坐标。本文为彻底解决组织运动产生的定位误差, 将提供有效的解决途径和平台。

参考文献:

[1] Lawrence T, Wang. Infrared patient positioning for stereotactic radiosurgery of extracranial tumors[J]. Computers in Biology and Medicine, 2001, 31: 101–111.

- [2] Sanford L. IRLED-based patient localization for linac radiotherapy[J]. Int. J. Radiation, Oncology Biol. Phys., 1998, 41(2): 433–439.
- [3] Dirk Verellen. Quality assurance of a system for improved target localization and patient set up that combines real time infrared tracking and stereoscopic X-ray imaging[J]. Radiotherapy and Oncology, 2003(67): 129–141.
- [4] M K Hu. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IRE Trans. Inform. Theory, 1962, IT 8: 179–187.
- [5] 秦磊, 舒华忠, 於文雪. Legendre 矩的两种快速算法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 25–28.
- Qin Lei, Shu Huazhong, Yu Wenxue. Two new algorithms for fast computation of Legendre Moments[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 25–28. (in Chinese)
- [6] H. Z. Shu, L. M. Luo, W. X. Yu and Y. Fu. A new fast method for computing Legendre moments[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(2): 341–348.
- [7] Sanjay Ranade, Azriel Rosenfeld. Point pattern matching by relaxation[J]. Pattern Recognition, 1980, 12(2): 269–275.
- [8] D J Kahl, A Rosenfeld and A Danker. Some experiments in point pattern matching[J]. IEEE Trans Syst Man Cyber, SMC-10(2), 1980: 105–116.
- [9] 史文谱. 求解线性方程组的一种新方法[J]. 计算力学学报, 2003, 20(6): 715–720.
- SHI Wenpu. New method in solving linear system of equations[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(6): 715–720. (in Chinese)
- [10] 葛云, 舒华忠, 罗立民. 基于 Legendre 正交矩的配准方法及其在二值图像配准中的应用[J]. 电子学报, 2001, 29(1): 55–57.
- Ge Yun, Shu Huazhong, Luo Liming. A New Way of Linear Registration Using the Legendre Orthogonal Moment and Application in 2-Value Image Data[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(1): 55–57. (in Chinese)
- [11] GY Yang, HZ Shu, C Tournoulin, GN Han, LM Luo. Efficient Legendre moment computation for grey level images[J]. Pattern Recognition, 2006, 39(1): 74–80.
- [12] 陈开明. 非线性规划[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1991.

作者简介:



葛 云 男, 博士, 副教授。1970 年出生于江苏扬州, 东南大学生物医学工程系博士毕业, 现在南京大学电子系任教, 从事医学图像处理、医学物理、计算机视觉、放射治疗等方面的研究。
E-mail: geyun@nju.edu.cn