

·影像技术 Technology·

基于 C 型臂微创手术导航的图像配准研究

刘卫东, 钟伟清, 张翼, 刘作勤

【摘要】 目的 提出一种将骨科术前 CT 与术中 X 射线图像配准的新方法, 为实现骨科微创手术导航。**方法** 配准分 2 步完成, 首先基于一种最近点迭代法进行快速粗配准, 再进一步提取图像的梯度特征, 根据投影变换原理, 采用寻找具有 CT 最大梯度投影位置的方法进行精配准。**结果** 在模拟数据及临床标本上进行实验, 配准率分别为 92% 及 82%。**结论** 本方法有良好的应用前景, 人工干预少, 适合于临床应用。

【关键词】 2D/3D 配准; 数字 X 射线图像; 计算机断层扫描; 手术导航

中图分类号: R445 文献标志码: A 文章编号: 1008-794X(2010)-11-0907-04

A multi-step 2D/3D image registration method for minimally invasive image-guided surgery LIU Wei-dong, ZHONG Wei-qing, ZHANG Yi, LIU Zuo-qin. Shandong Medical Imaging Research Institute, Ji'nan, Shandong Province 250021, China

Corresponding author: ZHANG Yi, E-mail: 1145@sohu.com

【Abstract】 Objective To propose a novel registration method with preoperative spine CT scans and operative X-ray images for guiding the performance of minimally invasive bone surgery. **Methods** The registration procedure was composed of two steps. First, an iterative closest point (ICP) algorithm was applied for coarse registration. Second, gradient feature was extracted. Based on the principle of projective transformation, the fine registration was performed by finding the maximum CT gradient projections. **Results** The rate of registration for simulation data and clinical phantom research was 92% and 82%, respectively. **Conclusion** The results of this study indicate that this novel registration method has good robustness with only a little human intervention, for this reason, it is suitable for clinical application. (J Intervent Radiol, 2010, 19: 907-910)

【Key words】 2D/3D registration, digital radiograph, computed tomography, image-guided surgery

微创外科被称为 21 世纪医学发展的三大主流之一, 它以医学影像代替肉眼直视, 应用专用器械代替传统手术刀, 力求以最小的切口和最少的组织损伤获得与传统外科手术同样的效果。如今, 微创外科治疗已经涉及全身各脏器、各组织的病变。从基本原理上看, 在微创条件下的手术导航与传统方式的手术导航并无本质区别, 但是, 由于微创的要求, 使两者在解决方案上有很大不同, 首先由于医师不能直接观察到手术部位, 因此需要导航系统提供精确的解剖信息, 这样就要求应用 CT 图像来替代传统的 X 射线图像。再者, 由于微创的要求, 无法在暴露手术部位放置标记物, 使得在患者空间到图像空间的配准方法上与以往方法有很大差别。因

此, 对微创手术导航来说, 首要任务是要解决 CT 图像的微创配准的问题。本文研究了一种利用患者术中 C 型臂采集的 X 射线图像 (2D) 同患者术前 CT 图像 (3D) 进行配准的方法, 间接获得 CT 与患者的配准关系。

1 材料与方法

C 型臂采用 Philips FD20, 空间分辨率 $1\,024 \times 768$, 灰度分辨率 12 bit。标定靶型号为 Traxtal 公司 FluoroTrax。CT 的扫描参数: 准直器宽度 2mm, 螺距 1.0, 视野 (FOV) $20\,\text{cm} \times 20\,\text{cm}$ 。光学跟踪设备采用 NDI 公司的 Polaris 以及配套的跟踪器械, Polaris 光学定位误差 $\leq 0.35\,\text{mm}$ 。所有程序运行于 Dell 650 工作站 (Xeon 2.8 GHz, 1 G RAM)。

配准之前进行 2 个相互垂直体位的 X 射线透视图像标定, 获得成像系统的内外部参数。配准过

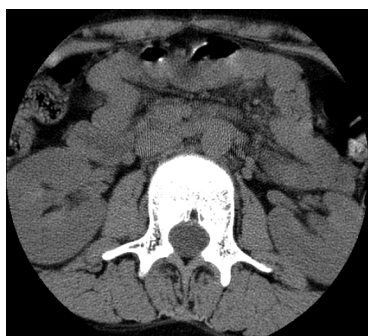
作者单位: 250021 济南 山东省医学影像研究所 (刘卫东、张翼、刘作勤); 济南市立四院放射科 (钟伟清)
通信作者: 张翼 E-mail: 1145@sohu.com

程采用分步的策略,首先进行初始对应关系的估计,利用体表解剖标记术前采用点配准的方法将初始的配准误差限制在 20 mm 以及 15° 之内,然后采用 ICP 迭代法进行基于几何特征的粗配准,将误差进一步缩小,最后使用基于密度特征的精配准^[1]。精配准的方法是根据 X 射线图像梯度与 CT 梯度投影的关系,利用相似性原理,配准转化成一个多参数最优化过程^[2],达到配准精度与速度间的平衡。

我们将实验分为 2 种模式:第 1 种模式采用临床上真实病例的 CT 数据,采用人工设定透视模型参数的方法,用 DRR 算法^[3]根据 CT 数据模拟生成 X 射线透视图像,这样可以获得精确几何模型下的 X 射线图像,保证了透视图像与 CT 图像的一致性,排除了标定误差、定位误差以及追踪误差的干扰,用来客观的评价 2D/3D 配准算法的效果。第 2 种模式在真实的手术条件下,采用骨骼标本模拟手术导航,利用导航工具进行跟踪定位。该实验结果包含了配准误差,标定误差、跟踪定位误差等,可以对整个基于 2D/3D 配准的手术导航效果做出综合的评价。

配准精度应用表面配准误差及 T 的各分量误差评估,其中表面配准误差:

$$sTRE = \| TP_{CT} - T_{gold} P_{CT} \| \quad (1)$$



a CT 数据场



b 侧位 DRR 图像



c 正位 DRR 图像

图 1 由 CT 断层数据生成的 DRR 图像

开始,直接在初始对应关系估计后误差范围内(距离误差小于 20 mm,角度误差小于 15°),随机生成 CT 模型位置,并以该位置到原位置的坐标转换关系作为 T_{gold} ,进行多次配准实验。

1.2 实验 2

在 C 型臂系统上采用人体骨骼标本模拟实际手术。术前将 5 个人工标记物附着在标本上进行 CT 扫描,如图 2。术中进行在线标定后,利用我们的算法将 CT 模型与 X 射线图像进行配准,计算出 CT 坐标系到患者坐标系的转换关系,进行导航实验。配准精度用 $sTRE$ 值进行评价, T_{gold} 值利用标记物点配准方法获得,配准过程从初始估计位置开始。

式中 T 为本文算法得到的坐标转换关系, T_{gold} 为标准坐标转换关系,可以人工指定或者通过点配准的方法得到, P_{CT} 为 CT 骨骼模型的表面点。 $sTRE \leq 3$ mm 认为配准成功。

定位精度应用标记点测量误差来衡量,该误差定义为:

$$fTRE(P, T) = \| TP_{CT} - P_{measure} \| \quad (2)$$

其中 T 为本文算法得到的坐标转换关系, P_{CT} 为 CT 骨骼模型的标记点的位置, $P_{measure}$ 为导航过程中用探针定位获得的标记点位置。利用 $fTRE$ 评价的优点在于不需要 T_{gold} ,而且将配准误差、空间定位误差、标定误差等因素都考虑在内,衡量了整个手术导航系统的精度。

1.1 实验 1

采用临床患者的骨骼 CT 数据及由其生成的模拟 X 射线图像进行配准。以腰椎病变的病例为例,首先将获得的 CT 图像进行预处理,得到分辨率各向同性的数据场。然后在世界坐标系内指定 X 射线焦点以及投影平面的位置,根据这些参数用 DRR 方式生成 2 ~ 3 幅不同角度的模拟 X 射线图像,如图 1 所示。

实验从配准的第 2 步:基于几何特征的粗配准

导航精度应用 $fTRE$ 进行评价,在配准成功的前提下,术中用探针定位骨骼标本上任意一个椎体的解剖特征点,如棘突、椎弓根等,由导航系统给出其在病人坐标系空间位置,同时利用交互式方法找到 CT 模型上该解剖标记点的位置,根据配准关系计算其患者坐标系中的位置,与导航系统给出的位置进行比较,进行 $fTRE$ 值的统计。

2 结果

实验 1 的统计结果如表 1。根据最终配准的结果绘制的直方图如图 3。实验结果表明在局部范围内配准函数具有单一的极值^[4],并出现在标准位置

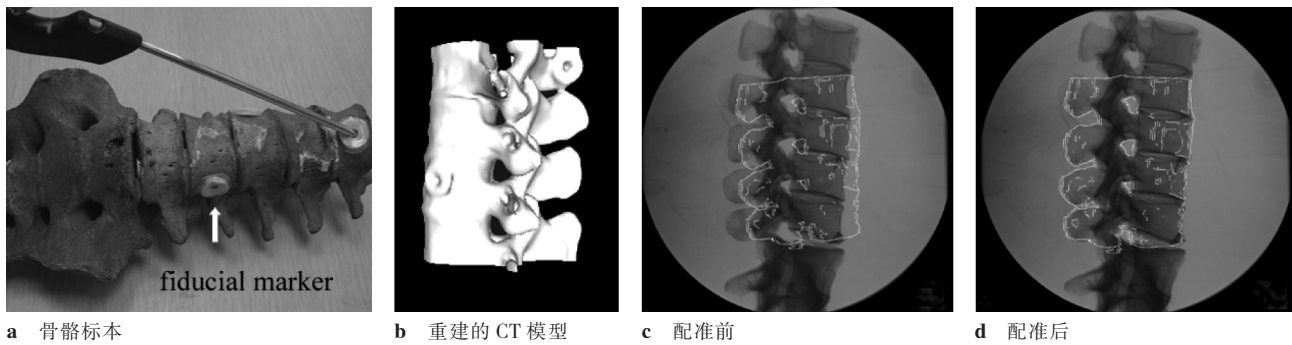


图2 骨骼标本的导航实验。将 CT 投影到 X 射线图像上以显示两者配准情况

表1 模拟数据的配准实验结果(距离误差单位 mm, 角度误差单位 $^{\circ}$)

步骤	sTRE	Δx	Δy	Δz	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	时间(s)	成功率
粗配准	5.50	3.18	2.66	3.31	1.37	1.69	0.94	61.6	92%
精配准	1.36	0.79	0.65	0.57	0.30	0.24	0.47	42.3	

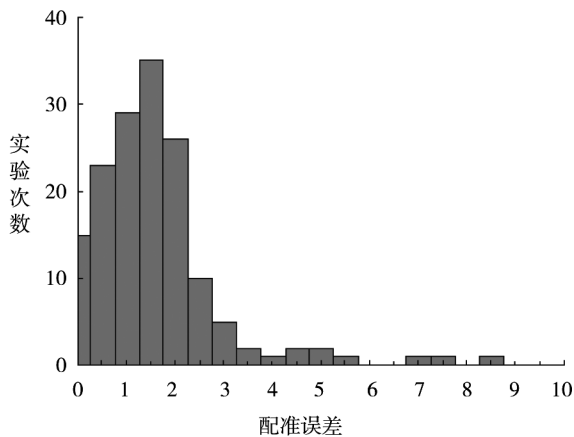


图3 模拟数据配准的 sTRE 直方图

附近, 曲线呈现出较好的收敛特性。

实验2统计结果见表2。根据最终配准的结果绘制的直方图如图4。在配准成功后, 导航精度测试结果见表3。统计分析的结果表明, 导航定位误差均值小于3 mm, 最大为3.257 mm, 三组实验的导航定位误差经用 Mann-Whitney U 非参数过程检验, 两两比较的 P 值均大于0.05, 因此误差无显著性差异。参照国外同类导航系统设计规范及临床应用经验^[5], 导航定位误差不应大于5 mm, 平均定位误差应小于3 mm, 从实验结果中可以看出本方法是符合手术导航应用标准的。

3 结论

本文采用基于不同特征的分步 2D/3D 配准方法, 较好的克服了单一配准方法的局限性。整个配准过程采用简单的交互操作, 有利于配准效率的提高。对于 X 射线图像而言, 由于本文算法只利用了其边缘的位置信息, 因此放宽了对成像条件的限

表2 标本配准实验结果(距离误差单位 mm, 角度误差单位 $^{\circ}$)

步骤	sTRE	Δx	Δy	Δz	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	时间(s)	成功率
初始位置	9.4	4.96	5.36	5.04	3.15	2.81	3.74	80.6	
粗配准	5.27	2.79	2.99	2.91	2.09	1.55	2.54	60.7	82%
精配准	2.28	1.08	1.31	1.06	1.14	0.98	1.27	62.1	

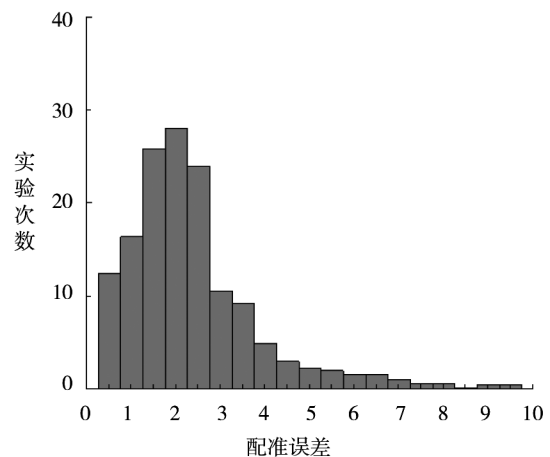


图4 标本数据配准实验的 sTRE 直方图

表3 基于 3D/2D 配准骨骼导航模拟手术中的解剖学标记分组及导航精度的测量值

解剖标记点	定位误差(mm)		
	实验1	实验2	实验3
椎体棘突上端	1.351	2.347	2.547
椎体左侧横突	3.125	2.904	2.240
椎体右侧横突	2.937	1.420	1.956
椎体左侧椎弓根	1.841	1.128	2.048
椎体右侧椎弓根	0.915	2.972	1.689
椎体左侧上关节突	2.682	2.452	1.782
椎体右侧上关节突	1.975	1.986	0.969
椎体左侧下关节突	3.024	1.584	2.058
椎体右侧下关节突	0.845	0.965	3.257
椎体前缘	2.571	1.354	0.972

制, 方便与不同类型的 C 形臂系统配套使用, 适用性得到提高。从实验结果上看, 配准效果达到预期目标。模拟实际手术的配准成功率虽然有所下降, 但部分原因是由于人工估计初始位置的角度误差较大造成的, 这在实际应用中可以采用根据患者体

表解剖标志点进行初始位置估计的方法加以避免。总之,本文提出的 2D/3D 图像配准方法在精度与速度上取得了较好的平衡,并且操作简便,能满足骨外科手术导航的临床需要。

[参 考 文 献]

- [1] Besl PJ, McKay ND. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1992, 14: 239 - 256.
- [2] 张 翼,王满宁,宋志坚. 脊柱手术导航中分步式 2D/3D 图像配准[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 29: 234 - 237.
- [3] Wein W, Roper B, Navab N. 2D/3D registration based on volume gradients [C] // Medical Imaging 2005: Image Processing, California, 2005: 144 - 150.
- [4] Press WH, Flannery BP, Teukolsky SA, et al. Numerical Recipes in C [M], 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992: 412 - 419.
- [5] Herring JL, Dawant BM, Maurer CR. Surface-based registration of CT images to physical space for image-guided surgery of the spine: a sensitivity study [J]. IEEE Trans Med Imaging, 1998, 17: 743 - 752.

(收稿日期:2010-07-10)

·消 息·

《中国介入影像与治疗学》杂志 2011 年征订启事

《中国介入影像与治疗学》杂志创刊于 2004 年,是由中国科学院主管,中国科学院声学研究所主办,中国工程院医药卫生工程学部协办的国家级学术期刊,主编为邹英华教授。刊号:ISSN 1672-8475,CN 11-5213/R。该刊现为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、中国科学引文数据库核心期刊、中国科技论文与引文数据库统计源期刊、中国期刊全文数据库全文收录期刊、荷兰《医学文摘》收录源期刊、俄罗斯《文摘杂志》收录源期刊、波兰《哥白尼索引》收录源期刊。

《中国介入影像与治疗学》杂志以报道介入影像与治疗学、介入超声学、介入材料学、药理学与护理学等方面的临床研究、基础研究以及医、理、工结合的成果与新进展为主,在学术上追求高起点、创新性;在技术上追求先进性、实用性和规范化;信息报导上追求真实性、时效性、可读性。本刊是介入影像工作者学习、交流的园地,也是图书馆必备的学术刊物。

《中国介入影像与治疗学》为双月刊,96 页,大 16 开本,彩色印刷。单价:16 元,全年定价 96 元。订户可随时向当地邮局订阅,邮发代号:80-220;亦可向编辑部直接订阅,免邮寄费(附言栏请注明订阅杂志名称)。

编辑部地址:北京市海淀区罗庄南里宏嘉丽园 1-301 邮编:100191

电 话:010-82050373/4

传 真:010-82050373/4-800

网 址:www.cjiit.com

电子邮箱:cjiit@mail.ioa.ac.cn