

基于光学定位技术的计算机辅助穿刺导航系统研制

王健¹, 李文浩², 葛云²

1. 常熟市第二人民医院医学工程部, 江苏 常熟 215500; 2. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210046

【摘要】目的:设计了一种基于光学定位技术的计算机辅助穿刺导航系统。该系统主要由硬件及软件模块组成, 可实现 DICOM 数据读取、标记病灶、穿刺路径规划、穿刺路径评估、三维显示、实时监控等功能。**方法:**该系统通过红外跟踪设备实时获取病人与穿刺针上红外定位球的位置信息, 将该信息传输给软件系统, 软件系统实时计算穿刺针与病灶之间的相对位置, 并在三维中实时渲染, 为医生提供实时可视化的穿刺引导。**结果和结论:**实验显示系统的穿刺精度可以达到 2 mm 以内, 标准差为 0.3 mm 左右, 提高了穿刺精度, 缩短了穿刺手术时间, 并实现了穿刺过程的实时监控。系统使得穿刺更加方便、迅速、精确。

【关键词】穿刺; 导航; 计算机辅助; 光学定位

【中图分类号】R318.6

【文献标识码】B

【文章编号】1005-202X(2016)02-0162-05

Computer-aided puncture navigation system based on optical positioning

WANG Jian¹, LI Wen-hao², GE Yun²

1. Department of Medical Engineering, Changshu Second People's Hospital, Changshu 215500, China; 2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: Objective A computer-aided puncture navigation system based on optical positioning is designed. The system mainly consists of hardware and software modules, achieving DICOM data reading, focus marking, puncture path planning, puncture path evaluating, three-dimensional (3D) displaying, real-time monitoring and so on. **Methods** The real-time location of infrared passive marker spheres on the patient and puncture needle were obtained by the infrared tracking equipment of the system. And the location information was transferred to the software system to calculate the relative position between the puncture needle and the focus, and to render the relative position in 3D model in real-time, providing real-time and visual puncture guidance for doctors. **Result and Conclusion** The puncture accuracy of system reaches 2 mm; the standard deviation is about 0.3 mm. The system improves the puncture accuracy, shortens the time for puncture, and realizes the real-time monitoring of puncture, leading to a more convenient, quicker and more accurate puncture.

Key words: puncture; navigation; computer-aided; optical positioning

前言

CT 引导下的经皮穿刺技术已经广泛应用于临床, 如活检、介入性治疗等。但如何将穿刺针送入目标区域这一关键问题仍然没有得到很好的解决^[1-3]。

目前, 临床上使用的方法是在人体表面贴一定位栅栏, 再对病人进行 CT 扫描; 医生根据 CT 图像, 在栅栏上进行标记; 接下来医生根据标记点, 将穿刺针送入目标区域; 最后, 对插有穿刺针的病人再次进行 CT 扫描, 以验证穿刺针是否在目标区域。在这一过程中, 医生需要根据经验确定穿刺针的角度与深度。穿刺的精度低, 风险大, 对病人的损伤大^[4-6]。

本文设计了一种计算机辅助穿刺导航系统, 在穿刺过程中, 该系统可为医生展示准确及实时穿刺引导信息, 并提供病灶标记、路径规划、三维显示和穿刺实时导航等功能, 使得穿刺更加方便、迅速、精确。

【收稿日期】2015-09-11

【基金项目】江苏省科技支撑计划(BE2012158)

【作者简介】王健(1968-), 男, 医学工程部主任, 高级工程师, 专业方向为医学工程; 主要从事大型医疗设备的临床应用研究和功能开发, 医学影像设备的配置引进及维护管理。Tel: 13506233660; E-mail: wangjian1186@126.com。

1 系统总体设计

1.1 工作原理

系统利用红外定位设备定位跟踪病人体表以及穿刺针上的定位小球,将定位小球的位置信息传送给电脑,通过软件进行信息处理,为医生术前提提供等剂量曲面勾画以及路径规划,并在手术过程中为医生提供实时的监控和导航,使得手术对正常组织的

危害降到最小。

1.2 系统结构

该计算机辅助穿刺导航系统主要由硬件和软件两个部分组成。硬件包含穿刺辅助设备、红外定位小球以及红外跟踪设备。软件主要包含数据定义、路径规划、实时监控等功能模块,系统的结构框图如图1所示。

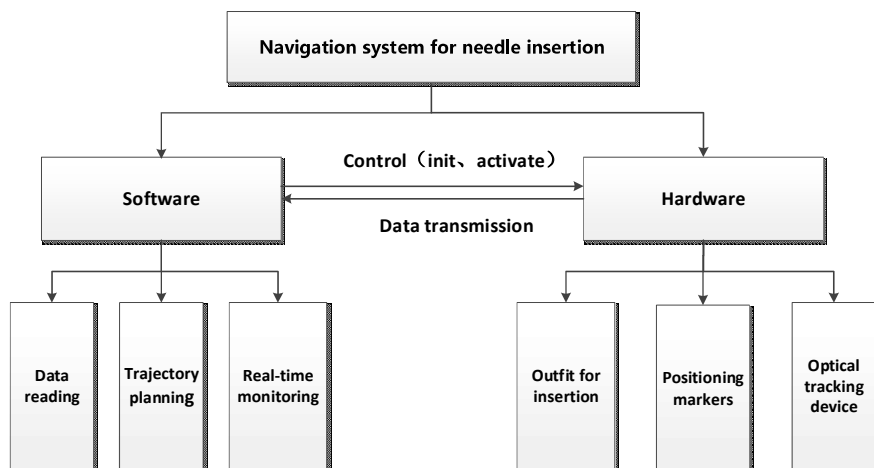


图1 计算机辅助穿刺导航系统原理框图

Fig.1 Diagram of computer-aided puncture navigation system

2 系统实现

系统通过红外跟踪设备探测并计算安装在目标物体上的红外定位小球的空间位置来间接定位跟踪目标^[7-8]。在病人体表及穿刺针上固定红外定位小球,红外跟踪设备可以实时得知病人与穿刺针的位置,并将相关数据传送给软件进行后续处理。

系统软件采用模块化设计,分为数据定义、三维可视化、路径规划和实时监控四个模块。

2.1 数据定义模块

该模块主要功能为:读取DICOM数据、勾画定位小球以及标记病灶。

医生导入病人DICOM CT数据后,在软件中以 x, y, z 三个维度显示所有CT图像。系统在原始CT图像中勾画出定位小球,在后续实时引导阶段中,系统将初始勾画的定位小球与通过红外跟踪设备实时读取的定位小球进行匹配,计算得到病灶的位置。标记病灶可以在CT图像上通过手动勾画完成。数据定义模块如图2所示。

2.2 三维可视化模块

医学图像的三维可视化技术是利用一系列的二维切片图像重建三维图像模型并进行定性、定量分析的技术。该技术可以从二维图像中获取三维信息,而且为医生提供更逼真的显示手段和定量分析工具。三维医学图像可视化技术作为有力的辅助手段能够弥补影像设备在成像上的不足,能够为医生提供具有真实感的三维医学图像。

目前医学体数据的三维可视化基本可分为两大类:面绘制和体绘制。我们采用的是体绘制的方法。

体绘制法又称为直接体绘制法,是将三维空间的离散数据直接转换为二维图像而不必生成中间几何图元。体绘制算法认为体数据场中每个体素都具有一定的属性(透明度和光亮度),通过计算所有体素对光线的作用即可得到二维投影图像。体绘制可利用模糊分割的结果,甚至可不进行分割即可直接进行绘制,有利于保留三维医学图像中的细节信息。但是在原始的体绘制过程中,一般要遍历体数据场中的每一个体素,因而计算量大,图像生成速度慢,因此体绘制适合对形状特征模糊不清的组织和器官进行显示。系统的绘制结果如图3所示。

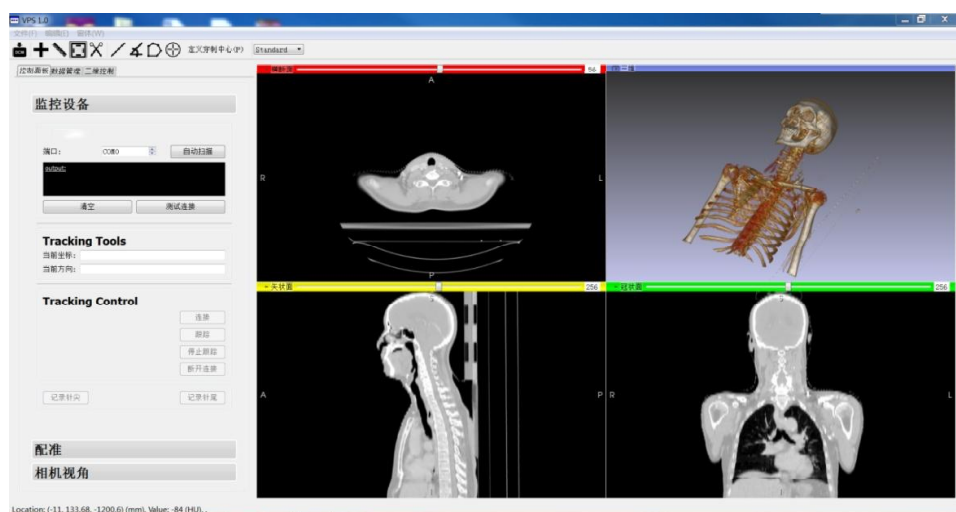


图2 数据定义及显示

Fig.2 Data definition and display

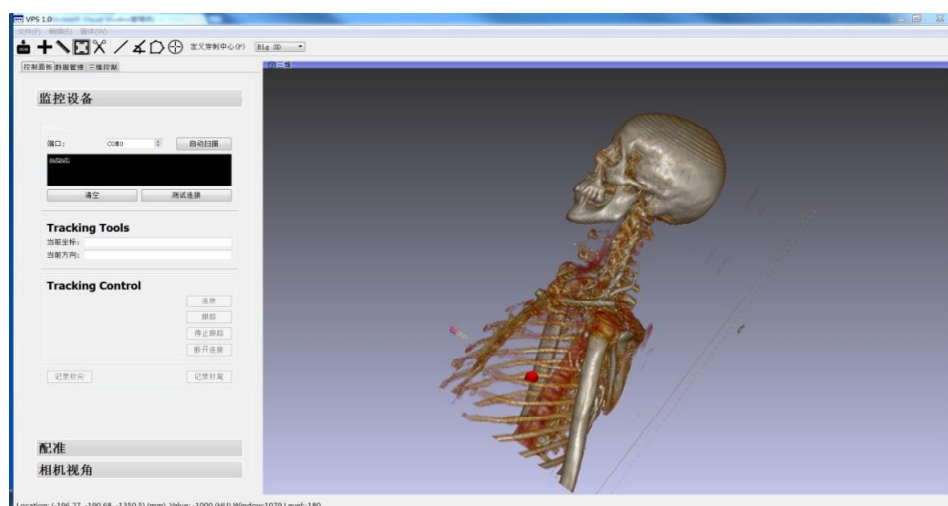


图3 体绘制

Fig.3 Volume rendering

我们使用的体绘制算法为体光线跟踪算法,该算法以图像空间为序从屏幕上的每一像素点出发,根据设定的视点方向,发出一条射线,这条射线穿过三维数据场的体素矩阵,沿这条射线选择 K 个等距采样点,由距离某一采样点最近的8个体素的颜色值及不透明度值做三线性插值,求出该采样点的不透明度值及颜色值。在求出该条射线上所有采样点的颜色值及不透明度值以后,可以采用由后到前或由前到后的两种不同的方法将每一采样点的颜色及不透明度进行组合,从而计算出屏幕上该像素点处的颜色值。该算法原理如图4所示。

2.3 路径规划模块

路径规划阶段允许医生自定义敏感组织,并自

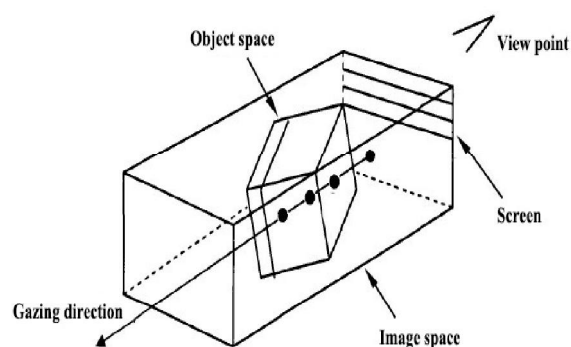


图4 体光线跟踪算法

Fig.4 Ray tracking algorithm

动规划出穿刺路径,同时将对各穿刺路径的评级结

果可视化。医生可凭借自己的经验从中选择一条最佳穿刺路径,或者也可以完全自定义穿刺路径^[9-11]。

软件主要从三个方面对穿刺路径进行评级:与敏感组织的距离、穿刺路径长度、穿刺的角度^[12-13]。

(1) 与敏感组织的距离限制

距离敏感组织较远的穿刺路径优于距离敏感组织较近的穿刺路径。

$$r_{c1}(tr) = \frac{d(tr) - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (1)$$

其中 $d(tr)$ 为所选穿刺路径到敏感组织的最小距离, d_{\max} 与 d_{\min} 分别为穿刺路径到敏感组织的最大距离和最小距离。

(2) 穿刺路径长度限制

长度较短的穿刺路径优于长度较长的穿刺路径。

$$r_{c2}(tr) = 1 - \frac{l(tr) - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \quad (2)$$

其中 $l(tr)$ 为所选穿刺路径的长度, l_{\max} 与 l_{\min} 分别为最长穿刺路径和最短穿刺路径的长度。

(3) 穿刺角度限制

与CT扫描纵向切面夹角较小的穿刺路径优于与该切面夹角较大的穿刺路径。

$$r_{c3}(tr) = \begin{cases} e^{-\frac{a(tr)^2}{20^2}} & ; a(tr) \leq 40 \\ 0 & ; a(tr) > 40 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $a(tr)$ 为穿刺路径与CT扫描纵向切面的夹角。

2.4 实时监控模块

实时监控可实时显示穿刺针的位置、角度以及

穿刺针与人体及病灶的相对位置关系,并提供穿刺引导信息。系统可实时采集贴于病人体表的定位小球的坐标进行配准计算,实现CT图像坐标系与实物所在的物理坐标系之间的转换,从而实时地获取穿刺针与病灶的当前位置,达到实时监控的效果^[14]。

系统采取的配准算法是点对配准算法(Paired-Point Registration)。点对配准算法的输入是两个点集合。其中一个集合中有 N 个点 X_i , 另外有一个对应的点集 $Y_i, i=1, 2, \dots, N$, 算法计算出这两对点集合之间的一个平移矩阵 t 以及旋转矩阵, 使得两对点的距离的均方根达到最小。这个距离通常称为标记点配准误差(Fiducial Registration Error, FRE), 配准的目标是寻找一个平移和旋转变换, 使得 FRE 的值最小。 FRE 的计算公式如下。

$$FRE^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|Rx_i + t - y_i\|^2 \quad (4)$$

当 $FRE=0$, 配准精度最高, 可以实现完全配准。然而, 在实际过程中由于在CT图像上选择点(X_i)的时候或多或少地存在误差, 以及空间畸变的影响, 这个最优结果只是近似值。

3 实验结论

使用该系统配合NDI Polaris Hybrid Position Sensor光学定位设备进行模拟穿刺实验。挑选了3组操作员进行实验, 每组进行10次操作, 每次穿刺完成后记录穿刺针尖到靶区中心的距离值Dis。每组实验完成后计算Dis的平均值、方差和最大值。得到的数据如表1所示。

表1 穿刺导航系统试验偏差统计结果

Tab.1 Deviation of computer-aided puncture navigation system

Group	Computer-aided puncture navigation system		
	Mean value (mm)	Standard deviation (mm)	Maximum (mm)
Operator A	1.52	0.26	1.78
Operator B	1.80	0.21	1.89
Operator C	1.76	0.32	1.92

数据显示, 该系统可以将穿刺精度控制在2 mm以内, 标准差为0.3 mm左右, 具有较高的稳定性, 完全可以满足临床的需求。在实际穿刺治疗过程中, 如果穿刺没有成达到目标区域, 则需要重新进行穿刺, 耗时较多且对病人造成更大损伤。该系统理论

上可以保证穿刺过程一次成功, 从而缩短了手术时间, 减轻了病人痛苦。

【参考文献】

[1] 裴敏剑, 郑伟良, 胡红杰, 等. CT引导下肺穿刺活检的安全性分

- 析[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2002, 25(2): 86-88.
- QIU M J, ZHENG W L, HU H J, et al. The security analysis of lung biopsy under CT guidance [J]. Chin J Tuberc Respir Dis, 2002, 25(2): 86-88.
- [2] 张雪哲. CT引导下胸部穿刺活检[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2001, 24(4): 194-195.
- ZHANG X Z. Chest biopsy guided by CT[J]. Chin J Tuberc Respir Dis, 2001, 24(4): 194-195.
- [3] 陈兴灿, 陆雪华, 潘建虎, 等. 自制定位器CT引导穿刺活检术和介入治疗术[J]. 实用放射学杂志, 2004, 20(3): 273-274.
- CHEN X C, LU X H, PAN J H, et al. Homemade locator for CT guided biopsy and interventional therapy [J]. Journal of Practical Radiology, 2004, 20(3): 273-274.
- [4] 王索宇, 吴艳红, 刁永生, 等. CT Pinpoint系统定位穿刺微创治疗肝肿瘤的研究[J]. 实用临床医学, 2007, 8(2): 109-110.
- WANG S Y, WU Y H, XI Y S, et al. Research of CT Pinpoint system for the treatment of liver tumors [J]. Practical Clinical Medicine, 2007, 8(2): 109-110.
- [5] 陈德路. 胸腹部肿瘤精确定位穿刺器械的研制及应用研究[J]. 国际生物医学工程杂志, 2013, 36(2): 111-115.
- CHEN D L. The develop and application research of instrument for chest tumor puncture [J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2013, 36(2): 111-115.
- [6] 李洪伦, 郭佑民, 郭晓娟, 等. CT引导下肺内孤立性病变更皮穿刺活检并发症的分析[J]. 实用放射学杂志, 2005, 21(5): 481-483.
- LI H L, GUO Y M, GUO X J, et al. The analysis of the complications caused by the lung biopsy with CT guided [J]. Journal of Practical Radiology, 2005, 21(5): 481-483.
- [7] ELFRING R, FUENTE M D, RADERMACHER K. Assessment of optical localizer accuracy for computer aided surgery systems [J]. Computer Aided Surgery, 2010, 15(1): 1-12.
- [8] RICHTER L, BRUDER R, SCHLAEFER A, et al. Towards direct head navigation for robot-guided transcranial magnetic stimulation using 3D laserscans: Idea, setup and feasibility [C]//Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE. IEEE, 2010: 2283-2286.
- [9] 宓士军, 吴立明. 基于影像学测量的椎体成形单侧入路穿刺进针点和穿刺路径[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(17): 3237-3240.
- MI S J, WU L M. Unilateral approach into the needle point and puncture path based on the imaging measurement [J]. Chinese Tissue Engineering Research and Clinical Rehabilitation, 2009, 13(17): 3237-3240.
- [10] 吴纯西, 沈旭平, 包梅芳. 健康志愿者不同路径和头位颈内静脉穿刺条件的比较[J]. 中华麻醉学杂志, 2008, 28(1): 91-92.
- WU C X, SHEN X P, BAO M F. The comparison of different paths and internal jugular vein puncture conditions of healthy volunteers [J]. Chinese Journal of Anesthesiology, 2008, 28(1): 91-92.
- [11] 刘长林, 宓士军, 高景春. CT测量穿刺路径在指导椎体成形术穿刺中的应用价值[J]. 中国全科医学, 2011, 14(3): 279-282.
- LIU C L, MI S J, GAO J C. Application value of CT measurement puncture path in guiding vertebral plasty puncture [J]. Chinese Journal of General Practice, 2011, 14(3): 279-282.
- [12] SEITEL A, ENGEL M, SOMMER C M, et al. Computer-assisted trajectory planning for percutaneous needle insertions [J]. Med Phys, 2011, 38(6): 3246-3259.
- [13] MAIER-HEIN L, TEKBAS A, SEITEL A, et al. In vivo accuracy assessment of a needle-based navigation system for CT-guided radiofrequency ablation of the liver [J]. Med Phys, 2008, 35(12): 5385-5396.
- [14] KORREMAN S S, JUHLER-NØTTRUP T, BOYER A L. Respiratory gated beam delivery cannot facilitate margin reduction, unless combined with respiratory correlated image guidance [J]. Radiother Oncol, 2008, 86(1): 61-68.