

三维适形放疗计划系统中的交互式测量方法

王阳萍¹, 党建武¹, 李莎², 朱正平³

(1. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州军区兰州总医院放疗科, 兰州 730050;

3. 兰州城市学院信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为了在制定三维适形放疗计划时合理地确定射线角度, 并根据给定射线方向准确计算射线剂量, 需要对三维模型进行精确的交互式测量。结合放疗计划系统的需求和医学图像特点, 分析三维交互式测量过程, 应用平行投影理论实现二维坐标到三维坐标的转换。提出以一个测量端点为起始点的三维任意叠加旋转算法, 在重离子放疗计划系统中实现三维精确测量。实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 三维适形放疗计划系统; 交互式测量; 平行投影; 三维旋转

Interactive Measurement Method in 3-D Conformal Radiotherapy Planning System

WANG Yang-ping¹, DANG Jian-wu¹, LI Sha², ZHU Zheng-ping³

(1. School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070;

2. Department of Radiotherapy, Lanzhou General Hospital of Lanzhou Military Area, Lanzhou 730050;

3. College of Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070)

【Abstract】 For obtaining appropriate angle of radiation and calculating accurate dose of radiation according to the given orientation of radiation while making 3-D conformal radiotherapy plan, it is necessary to do interactive measurement of 3-D model accurately. Integrating the requirement of radiotherapy planning system and the characteristic of medical image, this paper analyzes the process of 3-D interactive measurement, applies parallel projection theory to realize the coordinate transformation from 2-D to 3-D, and proposes 3-D arbitrary superimposed rotation algorithm which uses one measurement extreme point as origin. 3-D precise measurement is realized in heavy ion radiotherapy planning system. Experimental results prove that the method is feasible and effective.

【Key words】 3-D conformal radiotherapy planning system; interactive measurement; parallel projection; 3-D rotation

1 概述

三维适形放疗的目的是将放射剂量最大限度地分布到所要照射的靶区内, 并尽量降低肿瘤靶区周围的正常组织受量, 以获得最大治疗增益。在制定三维适形放疗计划时, 放射医师需要在放疗计划系统中根据由二维医学切片图像(CT 图或MRI 图等)重构三维人体模型, 观察靶区与重要器官之间的位置关系, 从而交互式地精确测量靶区与这些器官之间的三维距离以及射线沿放射方向在靶区中经过的长度。

由于计算机用二维屏幕显示三维物体, 因此用户需要在二维屏幕上交互式地完成三维测量。通过鼠标移动旋转人体三维模型选取欲测点, 并将拾取到的点二维坐标转换为三维坐标, 进而根据三维坐标系中 2 点间的距离公式以及相应医学图像中像素的实际几何尺寸计算人体中 2 点间的几何距离。可见, 在三维放疗计划系统中实现三维人体模型中任意 2 点间距离的测量时, 有 2 个关键步骤^[1-2]: (1) 屏幕上任意点二维坐标到三维坐标的转换; (2) 三维模型的任意旋转。本文对这 2 个步骤进行研究, 实现了在医学三维模型中方便地进行三维距离测量, 测量精度达 10^{-4} m。将本文算法集成到重离子放疗计划系统中(该系统要求靶区定位精度小于等于 1 mm), 取得了精确的测量结果。

2 二维拾取点坐标到世界坐标的转换

在交互测量时, 要得到三维模型上的特征点, 必需得到屏幕二维拾取点在 Z 方向的坐标值, 即实现二维空间坐标到世界坐标的转换。

二维空间坐标到世界坐标的转换是三维图形显示的逆向过程, 其步骤如下^[3-4]:

(1) 拾取鼠标点击处的屏幕坐标, 并将其进行投影和观察的逆变换。

三维物体投影到二维观察平面上, 有平行投影与透视投影 2 种基本的方式。平行投影保持物体的有关比例不变, 本文采用此投影方式, 以便在变换的基础上实现精确三维测量。平行投影模型如图 1 所示。

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目“重离子束治疗计划系统的研究与开发”(2006AA02Z499); 甘肃省科技攻关计划基金资助项目“基于图像融合与三维重建的重离子放射治疗计划平台研发”(0708GKCA047); 甘肃省自然科学基金资助项目“基于智能的交互式医学图像分割算法研究与应用”(0803RJZA015)

作者简介: 王阳萍(1973-), 女, 副教授、博士研究生, 主研方向: 医学图像处理; 党建武, 教授、博士生导师; 李莎, 主任医师、硕士; 朱正平, 副教授、硕士

收稿日期: 2009-06-07 **E-mail:** yp_wang@live.cn

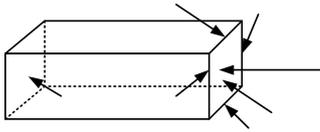


图1 平行投影模型

如果整个物体的三维坐标在 X, Y 和 Z 方向上的最小、最大值分别为 $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$ 和 $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$, 则可得 $left = -\max(|x_{\min}|, |x_{\max}|)$, $right = \max(|x_{\min}|, |x_{\max}|)$, $bottom = -\max(|y_{\min}|, |y_{\max}|)$, $top = \max(|y_{\min}|, |y_{\max}|)$, $near = -\max(|z_{\min}|, |z_{\max}|)$, $far = \max(|z_{\min}|, |z_{\max}|)$ 。

根据上述平行投影模型, 将一个屏幕坐标系下的二维点 $p(x, y)$ 转化到三维观察坐标系下的三维点 $p'(x', y', z')$ 的公式如下:

$$\begin{cases} x' = left + x / width(right - left) \\ y' = top - y / height(top - bottom) \\ z' = near \end{cases} \quad (1)$$

其中, $width, height$ 分别指投影视区的宽和高。先令 z 的值为 $near$, 通过求取经过视点和屏幕垂直的射线矢量来确定 z 的值。

(2) 获得经过视点与屏幕垂直的射线矢量与物体重叠相交的交点。

在放疗计划系统中, 人体三维模型由序列二维医学图像进行三维重建获得。三维面绘制可以满足三维适形放疗的要求, 在本文的研究中, 采用了 Marchcube 三维面绘制方法。应用 OpenGL 的函数可以获得任意三维模型中三角面片的顶点坐标。从该拾取的二维屏幕特征点出发, 垂直于屏幕向无穷远处发出直线 L , 根据直线与组成物体的三角片的求交算法能找到与 L 相交的、距离特征点最近的三角片(即交点的 Z 的绝对值最小), 以其交点的 Z 值做为相应三维特征点的三维观察坐标系的 Z 坐标值。

通过三维仿射变换将点的三维观察坐标转换为世界坐标。

3 三维交互旋转

在三维测量过程中, 用户需要选取被测物体上的特征点, 这些特征点可能在物体的任意部位, 而计算机屏幕是二维的平面, 三维物体上同一个点在旋转前后通常具有不同的投影结果, 因此, 需要采用交互旋转的方法^[5]。若以鼠标的位置表示三维物体上某个点的投影结果, 则鼠标位置的改变可以解释为该物体绕某一垂直于投影方向的轴的旋转。基于以上分析, 可以对三维旋转问题作如下转化: 鼠标沿屏幕上某一方向的移动等价于三维物体绕三维空间中某一条轴的旋转, 该旋转轴平行于屏幕且垂直于鼠标移动方向, 旋转角度由鼠标移动距离确定。

根据 3-D 跟踪球的原理, 二维屏幕上鼠标的移动是一个半球面而不是普通的平面, 如图 2 所示。

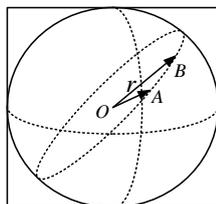


图2 模拟 3-D 跟踪球的二维屏幕鼠标移动(从 A 到 B)

鼠标移动时不是简单地从屏幕上的 A 点移动到 B 点, 而是在球 O 上沿着弧 AB 移动到 B 点。即向量 OA 沿圆 O 旋转到了向量 OB。三维模型可以按同样的方式进行旋转。本文设计的三维任意旋转算法步骤如下:

(1) 计算鼠标在半球面上的坐标

假设鼠标的屏幕坐标为 (x_s, y_s) , 在半球面上的坐标为 (x_h, y_h, z_h) , 则

$$x_h = x_s; \quad y_h = y_s; \quad z_h^2 = r^2 - x_s^2 - y_s^2 \quad (2)$$

其中, r 为半球半径, 一般可以设置为窗口高度的一半。此时, 可以求出 OA 和的坐标。

计算旋转角度

得到 OA 和 OB 的坐标后, 能利用余弦定理计算旋转角度:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{|AB|^2}{2r^2}\right) \quad (3)$$

(3) 计算旋转法向量

旋转法向量 n 垂直于 OA 和 OB 所决定的平面, 所以, 只要求得 OA 与 OB 的外积, 就能求出旋转法向量 n , 即

$$n = OA \times OB \quad (4)$$

三维模型绕任意方向法向量的旋转如图 3 所示。

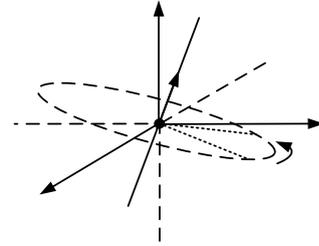


图3 三维模型绕任意方向法向量 n 的旋转

(4) 旋转矩阵

得到旋转角度和旋转法向量后, 可得旋转矩阵为

$$R_{\alpha, n} = \begin{bmatrix} (1-c)n_1^2 + c & (1-c)n_1n_2 - sn_3 & (1-c)n_1n_3 + sn_2 & 0 \\ (1-c)n_1n_2 + sn_3 & (1-c)n_2^2 + c & (1-c)n_2n_3 - sn_1 & 0 \\ (1-c)n_1n_3 - sn_2 & (1-c)n_2n_3 + sn_1 & (1-c)n_3^2 + c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $n = (n_1, n_2, n_3)$, $c = \cos \alpha$, $s = \sin \alpha$ 。

测量时以拾取到的起始点开始旋转, 随着鼠标在屏幕上的移动和点击, 多次旋转叠加, 最终旋转到合适的位置拾取到待测线段的终点。旋转叠加公式如下:

$$\begin{cases} p' = M_I \square P \\ M_n = R_{(\alpha, n)} \square T_A \\ M_i = R_{(\alpha, n)} \square M_{i-1} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, I$; p' 为三维图形中的某一点 p 经旋转变换后的结果; I 为旋转次数。

$$T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_x \\ 0 & 1 & 0 & A_y \\ 0 & 0 & 1 & A_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, $A(A_x, A_y, A_z)$ 为旋转起始点。

4 三维空间中 2 点间的距离测量

基于二维拾取点坐标到世界坐标的转换, 可以通过在二维屏幕上点击任意一点获取其世界坐标。通过三维交互旋转算法, 可以由用户任意地选取三维模型上的某 2 点。因此,

可以方便地应用 2 点间的三维距离计算公式求得三维模型中任意 2 点间的距离, 即

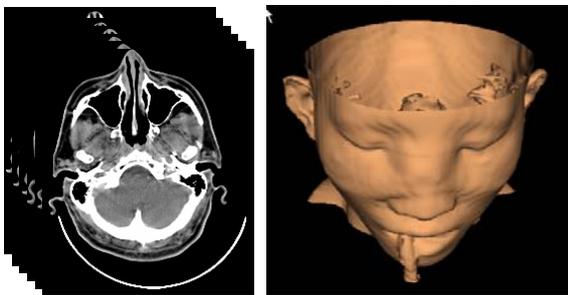
$$D_{AB} = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2 + (A_z - B_z)^2} \quad (7)$$

在放疗计划系统中, 对病人的 CT 和 MRI 等序列医学图像切片重建三维体后, 进行任意 2 点间三维距离测量时, 先从其 DICOM 格式的二维图像文件中直接读取像素的宽度 W 和高度 H , 并根据序列图像切片的间距和三维重建时片间插值要求, 获取三维体素的高度 Z , 然后用式(8)计算三维人体任意 2 点间的实际距离。

$$D_{AB} = \sqrt{((A_x - B_x) \times W)^2 + ((A_y - B_y) \times H)^2 + ((A_z - B_z) \times Z)^2} \quad (8)$$

5 重离子三维放疗计划系统中 2 点间的距离测量

在 VC++6.0 平台上, 应用 VTK 和 OpenGL 函数库, 并根据本文提出的方法开发重离子三维放疗计划系统中的测量子系统。为了给出清晰的点拾取、旋转以及最终测量的效果图, 对一个病人序列头颅 CT 图像的皮肤及骨骼进行面绘制, 得到如图 4 所示的三维模型^[6]。



(a) 头颅序列 CT 图 (b) 三维重建结果

图 4 某个病人的头颅序列 CT 图及其三维重建结果

图 5 为系统的三维测量界面, 给出了测量病人头部两耳根之间宽度的实例。在该例中, 测量宽度为 146.16 mm, 算法精度可达 10^{-4} m, 而重离子治疗计划软件系统要求靶区定位精度小于等于 1 mm, 因此, 采用本文提出的方法进行三维测量能满足靶区的定位精度要求(医学图像中靶区的分割和目标三维重建算法会影响靶区的定位精度)。

图 5 中标出了在旋转测量时, 通过鼠标移动在屏幕上拾取到的测量线段两端点的世界坐标以及当前移动点的二维屏幕坐标。在图 5 中, 初始拾取端点 point1 的世界坐标为(25.48, 93.86, 35.65), 测量线段末端点, 即当前拾取点 point2 的世界坐标为(171.61, 91.89, 38.01), 当前视区屏幕坐标为(365, 363)。

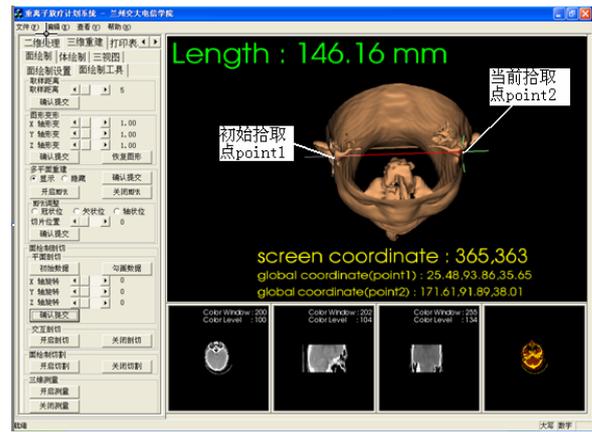


图 5 三维测量界面

6 结束语

由于鼠标等交互设备在屏幕上移动时只能获取目标的二维信息, 因此在三维适形放疗计划系统中, 应用软件方式实现精确的三维模型交互测量是一个难点。本文应用平行投影原理及射线与重叠三角形相交取最小值的方法实现二维坐标到世界坐标的转换。

本文在 VC++6.0 平台上, 应用 VTK 及 OpenGL 函数库实现了放疗计划系统的三维交互测量子系统, 取得了较高测量精度, 满足了三维适形放疗要求。本文算法适用于对其他三维模型的精确测量。

参考文献

- [1] 耿国华, 李小群, 周明全. 交互式空间三维距离测量[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(4): 296-299.
- [2] 苏国中, 郑顺义, 张剑清. 等. OpenGL 模拟摄影测量方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 540-544.
- [3] 姚继权, 李晓豁. 计算机图形学人机交互中三维拾取方法的研究[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 116-120.
- [4] Bade R, Ritter F, Preim B. Usability Comparison of Mouse-based Interaction Techniques for Predictable 3D Rotation[Z]. 2005.
- [5] Welling J S, Eddy W F, Young T K. Rotation of 3D Volumes by Fourier-interpolated Shears[J]. Graphical Models, 2006, 68(4): 356-370.
- [6] 郑庆师, 张洛平. 基于 B 样条插值的医学图像三维重构技术[J]. 计算机工程, 2006, 32(24): 229-231.

编辑 陈 晖

(上接第 6 页)

参考文献

- [1] Shenoy P, Vin H M. Cello: A Disk Scheduling Framework for Next Generation Operating Systems[J]. Real-time System, 2002, 22(1/2): 9-48.
- [2] Lund K, Goebel V. Adaptive Disk Scheduling in a Multimedia DBMS[C]//Proc. of the 11th ACM International Conference on Multimedia. Berkeley, CA, USA: [s. n.], 2003.

- [3] Bruno J, Brustoloni J, Gabber E, et al. Disk Scheduling with Quality of Service Guarantees[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems. Washington, D. C., USA: [s. n.], 1999.
- [4] Axboe J. fio-1.12.tar.gz[Z]. (2008-07-20). <http://brick.kernel.dk/snaps/>.

编辑 陈 晖