第32卷 第23期 计 算 机 工 程 2006年12月
Vol.32 No.23 Computer Engineering December 2006
·博士论文· 文章编号：1000—3428(2006)23—0004—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391.41

基于VTK的口腔种植手术导航系统的图像配准

陈晓军[1]，阎士举[1]，吴轶群[2]，王成焘[1]
(1. 上海交通大学生命质量与机械工程研究所，上海 200030；2. 上海第二医科大学附属第九人民医院，上海 200011)

摘 要：讨论了口腔种植手术导航系统的关键技术——图像配准的实现全过程。制作了聚丙烯树脂模板专用配准装置，以基于外部标志点的无创配准方法，在基于VTK的平台环境下，开发了软件系统获取虚拟坐标系与世界坐标系下的基准点坐标，并以ICP算法完成配准。应用实例表明，配准误差小于1mm，可以满足口腔种植手术临床需要。

关键词：口腔种植；计算机辅助手术；配准；手术导航；VTK

Registration in Image Guided Oral Implantology System Based on VTK

CHEN Xiaojun[1], YAN Shiju[1], WU Yiqun[2], WANG Chengtao[1]
(1. Institute of Life Quality via Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030;
2. Ninth People's Hospital, Shanghai Second Medical University, Shanghai 200011)

【Abstract】This paper introduces the key technology in the image guided oral implantology system (IGOIS) —— registration. With the fabrication of tooth-supported polymer resin templates, a software system is developed to obtain the coordinates of fiducial points respectively under the virtual coordinate system(VCS) and the world coordinate system(WCS) by programming in VTK so that non-invasive point-to-point registration is realized through ICP algorithm. The result shows that the RMS error is less than 1mm, which can meet the clinical requirements of oral implantology.

【Key words】Oral implantology; Computer aided surgery; Registration; Surgical navigation; VTK

口腔种植手术是口腔医学领域中应用最为广泛的手术之一，如何确保在理想的位置植入种植体，最大限度地利用骨量，并确保邻近重要生理组织结构的安全，仍然是临床医学界的一大难题。为此，各国科学家纷纷研制计算机辅助手术导航系统以指导临床医生在复杂条件下植入种植体，目前，专门应用于口腔种植手术的导航系统主要包括：德国Stryker Leibinger手术导航系统[1]，奥地利维也纳大学的Arne Wagner[2]等人开发的VISIT导航系统，以及以色列DenX公司的IGI导航系统[3]等。为了跟踪国际先进科技的进展，我们与上海市第九人民医院口腔种植中心合作，初步构建了计算机辅助口腔种植手术实时导航系统(Image Guided Oral Implantology System，IGOIS)，目前处于临床实验阶段。

配准技术作为IGOIS中的关键核心技术之一，直接关系到整个系统的精度和计算机辅助手术的成败。所谓配准，是指导航系统通过在虚拟坐标系(手术前，获取的CT、MRI等单模/多模医学影像经过医学影像处理后，在计算机图像空间形成的坐标系)与世界坐标系(手术中，导航系统的定位装置和手术区域解剖结构的实际空间位置构建成的坐标系)之间建立准确的对应关系，使其能将跟踪到手术器械和患者的运动正确实时反映在计算机屏幕上。

本文采用近年来在计算机图形学、图像处理及三维可视化领域都得到普遍应用的Visualization ToolKit(VTK)作为图形工具包，实现了口腔种植手术导航系统的图像配准功能。

1 VTK概述

VTK是美国Kitware公司开发的一套免费的C++类库，它容纳了众多优秀的图像处理和图形生成算法，是一个源代码开放、面向对象的计算机图形、可视化技术及图像处理软件系统，可在C++、Tcl、Java和Python语言环境下使用。因为它具有可在多种平台下运行、数据处理功能丰富和扩展性良好等特点，所以在开发IGOIS系统时，选择VTK作为开发平台。

VTK软件系统有两大对象模型：一类是作为所有图形的基础的图形模型；另一类是可视化过程的数据流模型。

1.1 图形模型

该模型主要用来将数据集的几何形状展示为直观的三维图形，完成图像生成和用户交互的功能，它由9个基本对象构成，即：

vtkRenderWindowInteractor——用于实现与绘制窗口的用户交互；
vtkRenderWindow——管理显示设备窗口；
vtkRenderer——进行坐标定位；
vtkLight——对场景中的vtkActor赋予光照度；
vtkCamera——定义场景的视角、焦点等属性；
vtkActor——场景中绘制的实体；
vtkProperty——用于设置vtkActor的表面属性；
vtkMapper——代表了实体的几何形状；
vtkTransform——定义vtkActor、vtkCamera、vtkLight的位置和方向。

1.2 数据流模型

VTK数据流模型由2类基本的对象组成：数据对象和处

基金项目：上海市科学技术委员会重点项目“多系列手术专用软件系统研发及其在骨科应用”(045115002)
作者简介：陈晓军(1976－)，男，博士生，主研方向：计算机辅助手术；阎士举，博士生；吴轶群，医学博士；王成焘，教授、博导
收稿日期：2005-12-18 **E-mail：**xiaojunchen@163.com

理对象，数据对象代表了进入可视化网络的数据集类型，处理对象按功能分为 3 种：数据源，过滤器，映射器。数据源对象用于产生或接收数据集，将其导入到可视化网络之中，是可视化网络的起点。过滤器用于对数据集进行各种算法的处理，它可接受一个或多个数据集输入，也可产生一个或多个数据集输出。映射器是可视化网络的终点，将处理后的数据集映射为可展示的几何形状[4]。

2 虚拟坐标系与世界坐标系下基准点坐标的获取

为了实现配准，必须获取基准参考几何体分别相对于虚拟坐标系与世界坐标系的空间位置，基准参考体可以是点集、线或面。与其它方法相比，基于点的配准方法较容易实现且精度较高，因而在本研究中得以采用。

2.1 虚拟坐标系下基准点坐标的获取

断层序列医学图像(CT、MRI 等)经三维重建后得到 stl 实体模型，可用 vtkLODActor 基类进行初始化，并用 vtkRenderer 显示在计算机屏幕上，用鼠标选取其上的配准基准点，采用光线跟踪算法求得实体模型与投射光线相交的最近的一个单元格(vtkCell)的数据集，从而得到基准点的三维坐标，其部分代码如下所示：

```
vtkTextMapper *textMapper;
vtkActor2D *textActor;
virtual void Execute(vtkObject *caller,
unsigned long, void*)
{
vtkCellPicker *picker =
reinterpret_cast<vtkCellPicker*>(caller);
   // 定义 picker
if (picker->GetCellId() > 0 )
{float xp,yp,zp;
float*pPickPoint=picker->GetPickPosition();
//得到 picker 选择点
xp=pPickPoint[0];
yp=pPickPoint[1];
zp=pPickPoint[2];
// 得到 picker 选择点的 x,y,z 坐标
CString str;
str.Format(_T("(%.3f,%.3f,%.3f)"), xp,yp,zp);
textMapper->SetInput(str);
textActor->SetPosition(picker->GetSelectionPoint()[0],
  picker->GetSelectionPoint()[1]);
textActor->VisibilityOn();//显示 picker 选择点的坐标值
}  }
```

2.2 世界坐标系下基准点坐标的获取

本研究采用加拿大NDI公司生产的Polaris混合式光学定位仪作为定位跟踪设备，可在 IGOIS 系统中用探针工具测得实际的基准点在世界坐标系的坐标，如图 1、图 2 所示。

图 1 用探针工具选取基准点

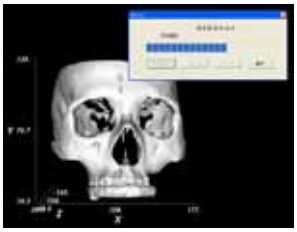

图 2 取点过程中计算机屏幕显示

其原理如下：设探针工具确定的坐标系为参考坐标系，如图 3 所示。

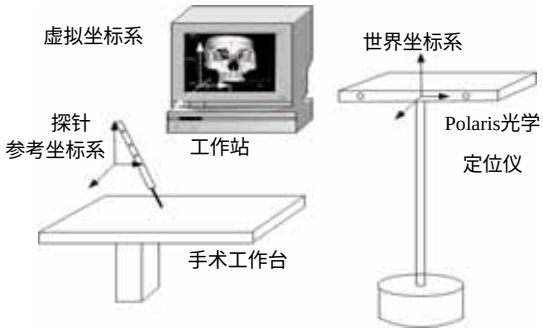

图 3 配准系统坐标系的建立

设 $\boldsymbol{R}_{SR0}=\begin{pmatrix} R_{00} & R_{01} & R_{02} & 0 \\ R_{10} & R_{11} & R_{12} & 0 \\ R_{20} & R_{21} & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为参考坐标系在世界坐标系下的旋转矩阵，$R_{ST0}=\begin{pmatrix} R_{ST_X} & R_{ST_Y} & R_{ST_Z} & 1 \end{pmatrix}^T$ 为参考坐标系在世界坐标系下的位移矩阵，$F_S=\begin{pmatrix} F_{S_X} & F_{S_Y} & F_{S_Z} & 1 \end{pmatrix}^T$ 为基准点在世界坐标系下的位置坐标，$F_R=\begin{pmatrix} F_{R_X} & F_{R_Y} & F_{R_Z} & 1 \end{pmatrix}^T$ 为基准点在参考坐标系下的位置坐标，则

$$F_S=R_{SR0}F_R+R_{ST0} \tag{1}$$

在 Polaris 定位系统中，用 7 个元素($a_0,a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6$)表示参考坐标系的刚体变换，这 7 个元素可由 Polaris 光学定位仪跟踪探针工具上的被动反光小球而实时测得，其中，后 3 个元素表示位移量，即

$$R_{ST0}=\begin{pmatrix} a_4 & a_5 & a_6 & 1 \end{pmatrix}^T \text{；} \tag{2}$$

前 4 个元素表示单位四元数，即 $a=a_0+a_1i+a_2j+a_3k$ ，其对应旋转矩阵为

$$\boldsymbol{R}_{SR0}=\begin{bmatrix} a_0^2+a_1^2-a_2^2-a_3^2 & 2(a_1a_2-a_0a_3) & 2(a_1a_3+a_0a_2) & 0 \\ 2(a_1a_2+a_0a_3) & a_0^2+a_2^2-a_1^2-a_3^2 & 2(a_2a_3+a_0a_1) & 0 \\ 2(a_1a_3-a_0a_2) & 2(a_2a_3+a_0a_1) & a_0^2+a_3^2-a_1^2-a_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

因基准点在参考坐标系下的位置坐标(即探针尖点在参考坐标系下的坐标) F_R 已知，故将式(2)、式(3)代入式(1)，即可求得基准点在世界坐标系下的位置坐标 F_S 。上述过程在 VC++环境下编程实现。

3 配准

基于点的配准方法主要分为：外部标志点配准法、解剖标志点配准法等。如采用有创工具作为外部标志点的配准方法，虽然配准效果比较精确，但将给患者带来身体创伤和痛苦，从而不为患者接受；如采用解剖标志点配准，则配准精度可能不够理想[5](Villalobos用解剖标志点配准得出的误差实验数据为 3.4±0.4mm)。为此，设计并制作了用于佩戴在患者牙齿上的聚丙烯树脂模板定位装置，其上分布有作为配准基准点的定位钛钉(如图 4 所示)，实现了基于外部标志点的无创配准功能。

图 4 定位配准用模板

本研究采用ICP算法(Iterative Closest Point algorithm)作为配准算法。ICP算法最初由Besl和Mckey[6]提出，是一种基于轮廓特征的点配准方法。如前所述，分别得到钛钉基准点在虚拟坐标系及世界坐标系下的坐标点集P={P_i, i= 0,1, 2,…,k}及U={U_i,i=0,1,2,…,n}。其中，U与P元素间不必存在一一对应关系，元素数目亦不必相同，设k≥n。配准过程就是求取 2 个坐标系间的旋转和平移变换矩阵，使得来自U与P的同源点间距离最小。

其过程如下：

(1)计算最近点，即对于集合U中的每一点，在集合P中都找出距该点最近的对应点，设集合P中的由这些对应点组成的新点集为Q={q_i,i=0,1,2,…,n}。

(2)采用最小均方根法，计算点集 U 与 Q 之间的配准，使 $\min\limits_{R,T}\sum\left\|q_i-(Ru_i+T)\right\|^2$ ，得到配准变换矩阵 R, T，其中 R 是 3×3 的旋转矩阵，T 是 3×1 的平移矩阵。

(3)计算坐标变换，即对于集合U，用配准变换矩阵R，T进行坐标变换，得到新的点集U_1，即 $U_1=RU+T$ 。

(4)计算U_1与Q之间的均方根误差，如小于预设的极限值ε，则结束，否则，以点集U_1替换U，重复上述步骤。

为实现配准算法，构造如下主要函数：

SetSourceLandmarks() 设置源点集合；

SetTargetLandmarks() 设置目标点集合；

SetModeToRigidBody() 定义刚性变换；

vtkIterativeClosestPointTransform () 用 ICP 算法计算变换矩阵；

GetMatrix() 获取变换矩阵。

4 应用实例

应用美国 GE 公司生产的 16 层螺旋 CT 扫描设备对一例左上颌骨次全切除后的患者头颅进行扫描，将 CT 数据以本研究所自主开发的 Medgraphics 软件进行三维重建，得到 stl 三维立体模型，然后通过熔融沉积制造(FDM)工艺方法，制作成塑性材料的颅颌面快速原型模型，利用其残余牙列，由医生制作用于无创配准的聚丙烯树脂模板，该模板上分布有 8 个作为配准基准点的定位钛钉。对其重新进行 CT 扫描，并再次经过三维重建后得到带有基准点的 stl 三维立体模型。

实验过程中，得到钛钉基准点在虚拟坐标系及世界坐标系下的坐标点集 P 及 U 数据如表 1、表 2 所示，IGOIS 系统求得的配准变换矩阵 R, T 为

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}0.2385 & 0.7684 & 0.5939\\ -0.9410 & 0.3341 & -0.0543\\ -0.2401 & -0.5459 & 0.8027\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}753.5918\\ 329.8617\\ 1339.3348\end{pmatrix}$$

表 1 基准点虚拟坐标系下坐标点集 *P*

序号	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	142.113	18.236	-55.271 3
2	135.245	21.974 5	-47.940 7
3	128.188	23.621 5	-42.735 9
4	118.165	25.326 6	-40.990 7
5	109.216	24.523 7	-41.464 3
6	97.661 9	22.49 7	-45.765 2
7	90.090 6	18.333 5	-52.577
8	114.17 9	19.197 2	-40.348 8

表 2 基准点世界坐标系下坐标点集 *U*

序号	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	481.704	186.686	-1 465.28
2	475.291	179.384	-1 463.94
3	470.404	171.663	-1 464.75
4	466.128	163.628	-1 470.45
5	464.21	157.063	-1 474.34
6	464.245	150.643	-1 483.46
7	469.498	145.914	-1 493.75
8	473.86	157.275	-1 470.92

均方根误差为 0.881 8mm，误差小于 1mm，可以满足口腔种植手术临床需要。配准结束后，配准变换矩阵 R, T 将通过 IGOIS 系统作用于手术器械模型，将探针移至某一实物基准点，可以看到计算机屏幕上探针模型的针尖也移至基准点(即图 5 中小点)，表明配准效果良好。

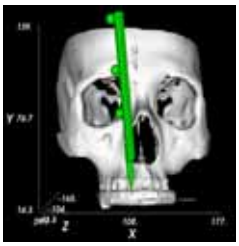

图 5 配准后计算机屏幕显示

5 结论

本文讨论了自主开发的口腔种植手术导航系统中图像配准模块的实现方法。在基于 VTK 的平台环境下，开发软件系统获取虚拟坐标系与世界坐标系下的基准点坐标，并以 ICP 算法完成配准功能。实验配准误差小于 1mm，可以满足临床需要。本文所讨论的配准方法可靠性高，易于实现，对患者无创伤，软件模块还具有良好的通用性和扩展性，亦可应用于其它计算机辅助手术导航系统。

参考文献

1 Spielberg M, Randelzhofer P. Image-guided Oral Implantology [EB-OL]. http://www.worlddent.com/2001/05/articles/strubj.xml.

2 Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F, et al. Evaluation of Accuracy of Computer-aided Intraoperative Positioning of Endosseous Oral Implants[J]. Clin. Oral Impl. Res., 2002, 13(1): 59-64.

3 Casap N, Wexler A, Tarazi E. Application of a Surgical Navigation System for Implant Surgery in a Deficient Alveolar Ridge Postexcision of an Odontogenic Myxoma[J]. Journal of Oral Maxillofac Surg., 2005, 63(7): 982-8.

4 李 嘉，胡怀中，胡 军等. 可视化三维图形库 Visualization ToolKit3.2 的原理及应用[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 5-6.

5 Maurer C R J, Fitzpatrick J M, Wang M Y, et al. Registration of Head Volume Images Using Implantable Fiducial Markers[J]. IEEE Trans. on Med. Imaging, 1997, 16(4): 447.

6 Besl P J, Mckay N D. A Method for Registration of 3D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 2(14): 239.