

文章编号:1004-7220(2012)04-0567-05

基于点信息的人体寰椎三维模型配准

焦培峰¹, 常建², 杨晓松², 焦樱², 刘芳德², 郭诗辉², 柏瑞³, 欧阳钧¹, 张建军²

(1. 南方医科大学基础医学院, 人体解剖学教研室广东省医学生物力学重点实验室, 广州 510515;

2. 英国伯恩茅斯大学媒体学院, 国家计算动画中心, 英国; 3. 广州军区广州总医院放射线科, 广州 510010)

摘要: **目的** 建立一种基于点信息的寰椎三维模型局部点配准方法, 为进行三维数据的统计建模奠定基础。 **方法** 以正常人体 CT 序列图像生成寰椎三维模型 30 个, 所有模型标注人工选择的对应点, 设为模板模型 1 个, 训练模型 20 个, 验证模型 9 个。首先进行训练组模型对模板模型的配准, 包括点信息的比较计算和权重系数的机器训练两步, 以自动配准点与人工选点的欧式距离之和为测度, 获得点配准公式及对应的最佳系数; 其次以验证组模型对模板模型进行配准, 统计自动配准点与人工选点的欧式距离值, 同训练组做对比分析, 评估方法的稳定性。 **结果** 获得配准函数及对应的最佳权重系数, 训练组和验证组配准结果误差分别为 1.983 和 2.045 mm, 统计分析表明两组结果没有显著性差异。 **结论** 此方法精度及稳定性均达到预期目的, 可用于寰椎模型之间感兴趣点的自动配准及统计建模工作中的元素分类。

关键词: 寰椎; 三维模型; 配准; 点信息; CT 扫描

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Registration for 3D model of human atlas based on vertex information

JIAO Pei-feng¹, CHANG Jian², YANG Xiao-song², JIAO Ying², LIU Fang-de², GUO Shi-hui², BAI Rui³, OUYANG Jun¹, ZHANG Jian-jun² (1. *Guangdong Provincial Medical Biomechanical Key Laboratory, Department of Human Anatomy, School of Basic Medical Science, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China*; 2. *National Centre for Computer Animation, The Media School, Bournemouth University, UK*; 3. *Department of Radiology, Guangzhou General Hospital of Guangzhou Military Command, Guangzhou 510010, China*)

Abstract: **Objective** To develop a registration method for 3D human atlas models by using geometric information of the vertices so as to lay a foundation for statistical modeling of atlas. **Methods** Based on CT images of the normal human, thirty 3D models of human atlases were created and marked by the manual selected points, including 1 standard module, 20 training sets and 9 testing samples. The training sets were first registered with the standard module, including calculation on geometric information of the individual vertex and optimization process of weight coefficients in the registration models. By minimizing the energy function defined with the Euclidean distances between the automatic registered points and the manual selected points in training sets, the optimized weight coefficients could be obtained. The testing samples were then registered with the standard module to calculate the Euclidean distances between the automatic registered points and the manual selected points. The results were then compared with the training sets to evaluate the stability of the registration method. **Results** The registration function and the corresponding optimized weight coefficients were obtained, and the average errors for the training sets and testing samples were 1.983 mm and 2.045 mm, respectively. Further statistical analysis showed that there were no obvious differences in the error distributions among the training sets and testing sam-

收稿日期:2011-12-16; 修回日期:2012-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31170903,31200708)。

通讯作者:欧阳钧,教授,Tel:(020)61648199; E-mail:jouyang@fimmu.com。

ples. Conclusions The accuracy and stability of the proposed registration method meet the requirement in medical applications, and it can provide automatic registration of points of interest on human atlas models and be used for element classification in statistical modeling.

Key words: Atlas; 3D model; Registration; Vertex information; CT scans

随着计算机图像图形技术的飞速发展,三维数据的智能化研究及应用成为新的研究热点^[1-3]。近年来,国外学者提出了统计形态模型、主动形态模型、点形态模型等概念来描述三维形体特征。这些模型的实质都是建立在一定样本量上的三维数据统计,既能体现模型共有特征,又保留了其中的特异信息^[4-6]。模型元素点、线、面的配准是构建统计模型的基础,通过建立不同模型间元素的对应关系,计算机能够自动识别形体结构,并结合具体指代关系实现对形体的实例分析。

将统计形态方法用于人体骨骼分析将为基于形态的骨骼应用研究带来质的飞跃。围绕人体骨骼形态的应用研究目前还比较落后。以器械设计为例,传统方法依靠人工采集一定数量骨骼标本的局部信息进行设计,较新的方法是利用计算机三维模型进行测量,方法改进而思路未变,众多研究彼此独立,耗费巨大^[7-8];器械设计的有限元分析和仿真实验也都是在少量模型上实现,缺乏对研究对象的分析,不具有代表性^[9-10]。建立统计模型并以之为基础进行临床手术或器械设计及仿真实验,能够更加贴近真实人体参数,从而适合不同的研究需求。

寰椎是颈椎中具有重要临床意义的一个节段,其位置关键且周边结构复杂,寰椎形态的异常变化将导致颅脑血供的改变及脊髓高位病变,而医疗活动中的一些不当处置也可能造成周边组织的损害,严重时危及生命^[11-12]。寰椎结构可视为带3个孔的圆环体,图形比较领域常用3类算法,即几何信息统计直方图比较、基于拓扑结构映射和基于视觉的图形学比较方法,对这种复杂结构配准都没有理想的算法,要解决形态各异的骨骼模型配准,必须提出专用的方法。本研究拟以寰椎为对象,尝试构建统计模型并将扩展应用研究,解决其关键的配准问题。

1 材料和方法

1.1 材料

成人颈椎 CT(设备型号:Siemens Somatom Defi-

nition 2008G)数据 30 套(中国人民解放军广州军区广州总医院放射线科提供),图像序列参数:512 × 512 像素,重建层厚 0.75 或 1 mm,图像格式:DICOM 3.0。病患行 CT 扫描的原因因为口腔疾病,寰椎节段无形态病变,获同意后进行本次研究。

1.2 方法

采用基于点信息的方法进行模型局部点的配准,基本过程包括模型重建及处理、点信息的计算比较、权重系数的机器训练和配准结果的分析评价。其中,点信息指 4 种点属性值,分别为对特征点的欧氏距离及测地距离^[13]、法线方向和曲率值,以不同点信息的差值与权重系数乘积之和为测度来确定配准点,权重系数通过对分布在 20 个模型上的 400 个点进行机器训练获得,最后对分布在 9 个验证模型上的 180 个点进行配准,并分析比较两组模型的配准误差。

1.2.1 模型重建及预处理 在软件 Mimics 10.01 (Materialise, 比利时)中进行 CT 序列的处理和三维重建工作。通过设定灰度阈值进行图像分割,人工修整分割结果,进行面模型重建。对骨的空腔进行填充处理后保存为 obj 格式。

利用 Autodesk Maya 2011 和 Matlab 2011b 对模型进行预处理。将模型进行去除噪声点和内部面片的处理,确保模型为单一连续面片集合。对模型进行网格细分及重构,所有模型的顶点数约为 5 000,面片数约为 10 000,且分布均匀。

在每个模型上依次人工选取 8 个点作为特征点,用来作为计算待配准点欧式距离和测地距离属性值的终点。本研究选取了模型上的一些边缘点作为特征点,如左右横突表面中心点。选取 1 个以主观认为形态较为适中的模型作为模板,随机挑选 20 个作为训练模型,剩余 9 个作为验证模型。在模板上选择 20 个感兴趣点,在每个训练模型和验证模型上对应位置同样顺序也选择 20 个点。训练模型用来进行计算机配准点与人工选点的比较优化而得到最佳权重系数,验证模型用来进行计算机配准点与

人工选点的比较以评估结果。

1.2.2 点属性值计算 选择模型顶点的4个属性值作为配准时的比较对象,分别是待配准点与特征点的欧式距离、与特征点的测地距离,法线方向以及曲率值。考虑到法线方向的相对性问题,在计算点属性值之前,利用ICP(iterative closest point)方法对模型位置进行配准,使得所有模型大体形态相同。为了消除由于模型大小不一而带来的问题,计算模型间长度差值时以最小约束长方体体积消除了体积比率差。顶点曲率共有4个基本属性值,分别为最大、最小曲率及各自方向,可派生出平均曲率(曲率平均值)及高斯曲率(曲率乘积)。本研究选取最大和最小曲率数值作为模型顶点属性。

1.2.3 点配准的实现 利用点信息进行配准是基于模型类似部位特征相似的原理,然而考虑到模型之间的差异,仅依靠点信息还不能实现最佳匹配,引入点属性差值的权重系数来进行配准的优化。具体方法为:

(1) 每次提取模板上一个感兴趣点进行配准,计算待配准模型上一点与当前感兴趣点的属性值差,欧氏距离差可表示为

$$D_d = \left\| \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_8 \end{bmatrix}_T - \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_8 \end{bmatrix}_S \right\| \quad (1)$$

测地距离差可表示为

$$D_g = \left\| \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_8 \end{bmatrix}_T - \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_8 \end{bmatrix}_S \right\| \quad (2)$$

法线方向夹角可表示为

$$D_N = ac \cos(N_T, N_S) \quad (3)$$

曲率差值表示为

$$D_C = \frac{2}{\sqrt{(C_T^{\max} - C_S^{\max})^2 + (C_T^{\min} - C_S^{\min})^2}} \quad (4)$$

式中,下标T表示待配准模型、S表示模板模型。单点对应8个特征点的欧式距离和测地距离均表示为 8×1 矩阵,两点差值求模以便于比较; C^{\max} 和 C^{\min} 表示最大曲率和最小曲率。至此,待配准模型上一点*i*与当前感兴趣点的属性差值可表示为

$$P_i = \begin{bmatrix} D_d \\ D_g \\ D_N \\ D_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

遍历待配准模型所有点求此差值,得到 $4 \times n$ 的点属性差值矩阵 P ,可表示为

$$P = [P_1 \dots P_i \dots P_n] \quad (6)$$

实际运算中,每项差值均进行了归一化处理。

(2) 属性值差与权重系数的乘积和最小值对应点即是最佳匹配点,可表示为

$$M = \min(W * P_i) \quad (7)$$

式中: W 为 1×4 矩阵,包含了分别对应4个属性值差的系数, $W * P_i$ 为 $1 \times n$ 矩阵, M 即为所有 n 点中的最小值。

1.2.4 权重系数的优化 为获得最佳权重系数,构建能量函数,以分布于20个训练模型上的400个人工选点与自动配准点的欧式距离之和为其值。计算时,遍历不同权重系数组合得到不同配准结果,求此能量函数最小值,对应的权重系数即为最佳,此时配准点与人工选点最为接近。无疑最理想情况是所有配准点都能与人工点重合,此时能量函数值为0。

实际运算中,权重系数 W 包含4个独立数值,训练过程采用分步遍历算法进行。首先确定系数值的大致范围:预估系数间倍差关系不会大于10,故起始设置每个系数都为 $[0, 1, 2, \dots, 10]$,遍历组合计算能量函数值,取最小值时系数 W_1 ;然后以 W_1 各系数值为中点重构系数范围重复上一步运算,直到能量函数值稳定;再以上一步所得各系数值为中点,缩小步进长度重构系数范围,求更精确的系数值 W_2 ,并将此过程循环直到能量函数值稳定,运算过程中的系数值均采用了归一化处理。

1.2.5 点配准的评估 配准结果的评估可以通过人的主观认定或定量计算来进行,考虑到人工选点的主观性及结果对照时可能产生的诱导性,请解剖专业老师事先选择对应点,然后计算配准结果与这些对应点的欧式距离值来评估本方法的配准精度。本研究全部30个模型均包含约5 000个顶点及约10 000个三角面片,全样本计算面片平均面积为0.813,即相邻点距均值为1.275 mm,以此点距均值为度量,即可知道配准结果与老师选点之间的差距幅度。

具体做法为:将9个验证模型与模板模型进行配准,用前述方法及最佳权重系数矩阵计算此时180个配准点与验证模板上人工选点的欧式距离值及分布情况,并将此组结果与训练组结果进行统计

比较,评估方法的稳定性。

2 结果

完成训练组和验证组模型对模板局部点的配准,并获得最佳权重系数一组。训练组配准结果与人工选点欧氏距离之和最小值为 793.158 2,平均距离值为 1.982 9 mm,此值介于 1 倍与 2 倍相邻点平均距离之间,此精度达到了设计预期。此时对应权重系数为 $W = [1.9 \ 11.8 \ 8.6 \ 4.8]$ 。配准点与人工选点距离分布如图 1 所示,配准点与人工选点位置比较如图 2 所示。

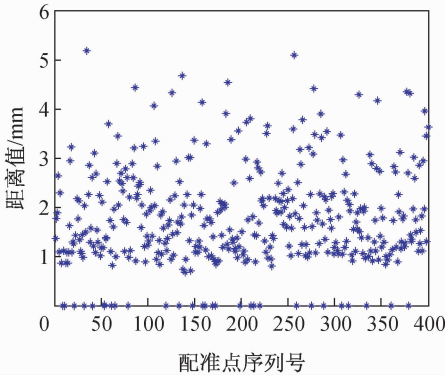


图 1 训练配准点与人工选点距离值分布
Fig. 1 Distance distributions of registered training points and manual selected points

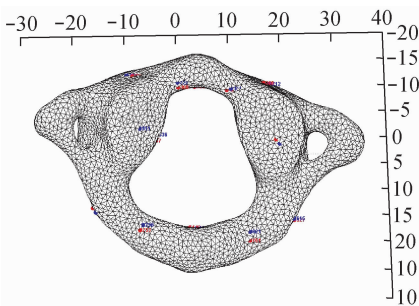


图 2 训练模型配准结果(蓝色为配准点,红色为人工选点,数字为点序号)
Fig. 2 Registration results of the training set

利用此权重系数对 9 个验证模型进行配准,配准结果与人工选点欧氏距离之和为 368.154 0,均值为 2.045 mm。配准点与人工选点距离分布如图 3 所示,配准点与人工选点位置比较如图 4 所示。

训练组和验证组配准误差结果均呈正态分布,对两组误差进行独立样本 t 检验。对统计分析结果

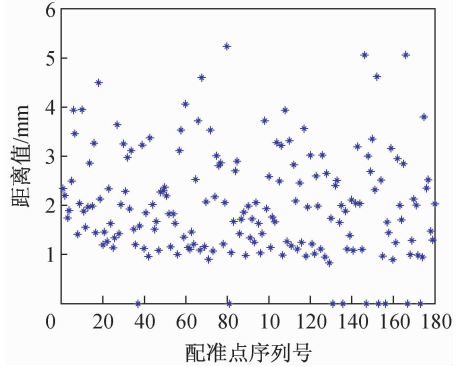


图 3 验证配准点与人工选点距离分布
Fig. 3 Distance distributions of registered testing points and manual selected points

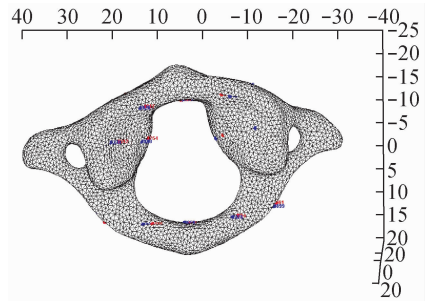


图 4 验证模型配准结果(蓝色为配准点,红色为人工选点,数字为点序号)
Fig. 4 Registration results of the testing sample

进行分析:训练组平均误差为 1.982 9,验证组平均误差为 2.045 3,经独立样本 t 检验,方差齐性检验指标 $F = 2.422, P = 0.120$,表明两方差齐,此时 $t = -0.571, P = 0.568 (> 0.05)$,说明训练组和验证组的配准结果并无显著性差异。

3 讨论

本研究配准对象是成人寰椎模型的感兴趣点,这些点在临床手术操作和骨科相关研究中具有重要的参考价值。观察两组的配准结果,配准点与人工选点误差集中于 1 ~ 3 mm,整体平均距离在 2 mm 左右,可认为总体上配准点与人工选点相邻或在其二阶领域内。两组结果中误差为 0 即配准点与人工选点重合的情况共有 40 对,所占比例还不够高,排除人工选点因素,目前的结果达到了预期的设计目标。对结果进行分类分析及趋向性分析还可进一步提高配准精度,这是下一步改进的方向。对两组结果的

统计分析表明,训练组和验证组的误差没有显著性差异,故本研究所用方法稳定性较好。

本研究中用到的点信息包括4个属性值,两项距离值能够确定配准点的位置区域,法线和曲率比较局部信息,最佳权重系数值表明测地距离和法线方向是此方法中最重要的两顶点信息,而欧氏距离的影响最小;本文认为,欧氏距离与测地距离具有一定的相关性,两者对结果的影响并没有如此明显的差别;经过对运算过程的分析,认为是结果取最大值而非极值的原因。法线方向对结果的影响较大,故模型的体态配准需要做好;此外,对平面和管状面而言,某方向上临近点法线方向趋同,对结果的作用钝化。曲率与法线方向有同样问题,在将来的研究中可考虑将曲率的4个参数全部使用,但模型的平滑处理程度需要综合考虑。

本研究中配准误差的原因分析如下:

(1) 算法自身。本研究中心信息包含了对特征点的欧氏距离和测地距离、法线方向和曲率4个属性值,都有一定的局限性,虽然引入了优化的权重函数,但仍会出现作用钝化的情况。

(2) 人工选点。为模型进行人工选点时,由于模型的差异及主观原因,不同人员及不同模型间选点会不一致。本文人工选点包括两种,一种是特征点的选取,另一种是感兴趣点、训练点和验证点的选取。特征点的不一致对最后结果的误差贡献非常小:每个点信息的计算考虑了4个因素,其中到特征点的欧氏距离和测地距离与特征点的选取有关,而这两个信息中又分别包含了8个距离,特征点的差别对一组距离值而言影响很小,对整个配准结果影响更小。训练点和验证点的选取对最后的结果影响较大,由于这两组点的选取直接关系到评判标准的数值,也直接影响权重系数的训练结果,所以对误差的影响较大。

(3) 模型形态。不同模型之间有一定的差别,即使人工选点也不易确定对应关系,这些误差较难消除;此外由于模型平滑程度不同,局部点的法线及曲率可能会出现突变,也对配准精度有一定的影响。

4 结语

本研究开发基于点信息针对成人寰椎模型局部点的配准方法,通过对模型的预处理、训练和评估,

最终得到的配准函数达到实用的要求并且具有较好的稳定性,可在寰椎三维模型上进行感兴趣点的自动配准。在本研究的基础上,进一步提高配准精度以及减少人工干预是下一步的研究目标。

参考文献:

- [1] 彭延军,石教英. 体绘制技术在医学可视化中的新发展[J]. 中国图像图形学报, 2002, 7(12): 1239-1245.
- [2] 田和强,吴冬梅,杜志江,等. 医学影像三维可视化系统的设计与实现[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 270-274.
- [3] 胡南,郑小林,张绍祥,等. 基于虚拟现实的女性盆腔可视化及手术仿真[J]. 中国医学影像技术, 2010, 26(2): 340-342.
- [4] Cootes TF, Taylor J, Cooper DH, et al. Active shape models- their training and application[J]. Comput Vis Image Und, 1995, 61(1): 38-49.
- [5] Heimann T, Meinzer HP, et al. Statistical shape models for 3D medical image segmentation: A review [J]. Med Image Anal, 2009, 13(4): 543-563.
- [6] Shen D, Herskovits EH, Davatzikos C, et al. An adaptive-focus statistical shape model for segmentation and shape modeling of 3-D brain structures [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2001, 20(4): 257-270.
- [7] 周凤金,倪斌,刘洪超,等. 一种后路寰椎椎动态内固定系统的研制及其解剖学研究[J]. 脊柱外科杂志, 2011, 9(3): 183-186.
- [8] 王建华,尹庆水,夏虹. 数字骨科技术在寰椎椎个体化置钉手术中的应用[J]. 脊柱外科杂志, 2011, 9(3): 165-168.
- [9] 漆伟,雷伟,严亚波. 椎弓根螺钉长度变化对螺钉-骨复合体模型应力影响的三维有限元分析研究[J]. 医用生物力学, 2010, 25(3): 206-211.
- Qi W, Lei W, Yan YB. Three dimensional finite element analysis of stress distribution on continuously varying of length of pedicle screw [J]. J Med Biomech, 2010, 25(3): 206-211.
- [10] 苏晋,赵文志,陈秉智,等. 建立全腰椎有限元接触模型[J]. 医用生物力学, 2010, 25(3): 200-205.
- Su J, Zhao WZ, Chen BZ, et al. Establishing finite element contact model of human L1 ~ L5 lumbar segments [J]. J Med Biomech, 2010, 25(3): 200-205.
- [11] 尹庆水,夏虹,王建华. 寰椎椎脱位治疗的现状与展望[J]. 脊柱外科杂志, 2011, 9(3): 129-130.
- [12] 徐晖,徐华梓. 寰椎椎不稳的外科治疗进展[J]. 脊柱外科杂志, 2011, 9(3): 188-190.
- [13] Mitchell JSB, Mount DM, Papadimitriou CH, et al. The discrete geodesic problem [J]. SIAM J Comput, 1987, 16(4): 5-26.