

文章编号 1004-924X(2017)增-0250-09

## 基于高斯曲率和向量内积的人体脊柱 模型特征点的改进

鱼 滨<sup>1</sup>, 惠 宇<sup>2\*</sup>, 武君胜<sup>3</sup>, 张 琛<sup>1</sup>, 张田田<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 计算机学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 计算机学院, 西安 710072;

3. 西北工业大学 软件与微电子学院, 西安 710072)

**摘要:**针对脊椎结构的复杂性和医学图像采样数据量庞大的问题,提出了一种利用高斯曲率和向量特征改进人体脊柱模型特征点的标注方法,该方法根据模型上某点局部邻域内各点的高斯曲率值和向量内积来动态调整手动标注点的物理坐标。首先,利用三维重建和网格划分生成人体脊椎三维网格模型;然后,手动拾取模型上一点作为初始拾取点,以极小半径  $R$  的球形空间作为拾取点的最大近似邻域,在此基础上求出点邻域内所有顶点的高斯曲率绝对值;最后,选取上述高斯曲率值中较大的  $n$  个点,分别求取这  $n$  个点与初始拾取点之间的向量内积,进而求出  $n$  个点中与初始拾取点间夹角角度最小的点,从而将初始拾取点坐标修正为上述夹角角度最小点的物理坐标。该方法在确保取得邻域内尽可能大的高斯曲率值的同时,可以使标记结果更趋近于真实的特征点,实验结果表明,该方法定位脊椎三维模型特征点的准确性约提高 29%,且该方法针对脊椎模型的平滑区域具有较好的标注效果。

**关键词:**脊椎模型;三维网格模型;特征点标注;高斯曲率;向量内积

**中图分类号:** TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0250

## Tagging for improving feature points of human spine model by using Gaussian curvature and vector inner product

YU Bin<sup>1</sup>, HUI Yu<sup>2\*</sup>, WU Jun-sheng<sup>3</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, ZHANG Tian-tian<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science, XI DIAN University Xi'an 710072, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. College of Software and Microelectronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

\* Corresponding author, E-mail: 289178013@qq.com

**Abstract:** A tagging method for improving feature points of human spine model by using Gauss curvature and the vector feature was proposed in the thesis to dynamically adjust physical coordinates of tagging points based on Gauss curvature values and vector inner products of various points located in local neighborhood in this model. Three-dimensional reconstruction and mesh dividing was used to

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2017-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61172147); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 61502365)

generate 3D mesh model of the human spine; and then, a point in manual pick-up model was chosen as the initial pickup point. Spherical space with minimal radius  $R$  was regarded as the maximum approximate neighborhood of the pickup point, based on which absolute values of Gauss curvature for all vertices in the neighborhood of the pickup point were calculated;  $n$  points with larger values from above Gauss curvature values were selected to calculate vector inner product between these  $n$  points and initial pickup point and further calculate the point from these points which had the minimum included angle with the initial pickup point, finally, coordinate of the initial pickup point would be corrected to the physical coordinate of the point which had the minimum included angle. The method makes sure that Gauss curvature value taken from the neighborhood is the largest possible value, it can make tagging results closer to the real feature point at the same time. Experimental results show that the method improves the accuracy of positioning feature point of spinal 3D image by about 29%, besides, relatively good tagging results can be obtained by the method for smooth region of the spine model.

**Key words:** spine model; 3D mesh model; feature point labeling; Gaussian curvature; vector inner product

## 1 引 言

人体三维脊柱模型的特征点标注,作为辅助脊椎科学度量数据的提取,对脊椎疾病的诊断和治疗有着重要意义。总的来说,图像特征提取及标记特征点的方法基本分为两类:一类是基于模板匹配的方法,如 Smith、Brady 等人于 1997 年提出的 SUSAN 检测算法<sup>[1]</sup>;Lowe D G 于 1999 年提出了一种基于尺度空间、对图像缩放、旋转甚至仿射变换保持不变的图像局部特征描述算子 SIFT,并于 2004 年加以完善<sup>[2]</sup>;李康等提出了一种基于深度图像的人脸三维模型特征点标定方法,采用 SUSAN 算子在生成的二维深度图像上标定特征点<sup>[3]</sup>;但是该类算法针对的模型点数庞大,计算复杂度较大,无法满足医学研究在实效性上的要求。另一类是通过图像的点、线、轮廓或者曲率、矩阵向量等来提取图像的特征,如刘倩、耿国华等提出一种基于高斯映射和曲率值分析的三维点云模型尖锐特征线提取算法,具有良好的自适应性、抗噪性和准确性<sup>[4]</sup>;马骊溟、徐毅等提出一种基于测量点的曲率极值点提取特征点的方法<sup>[5]</sup>;韩霜等提出的基于高斯曲率的脊椎模型标注算法<sup>[6]</sup>;目前该类算法在实现特征点的标记精准上都还显得比较困难,提高特征点标定的准确性也一直是研究的热点和难点。

由于脊椎结构的复杂性和医学图像采样数据量的庞大,计算机辅助诊断在医学影像上的立体

定位和配准就变得相当复杂,通过提取精确的标注点来获得脊椎模型高精度的科学度量数据则是解决定位和配准问题的关键环节。本文提出了一种利用高斯曲率和向量特征改进人体脊柱模型特征点的标注方法,具有准确性高且易于实现的特点。该方法在手动标注的基础上修正特征点物理坐标,以达到提高手动标注准确度的目的。算法通过遍历手动拾取点在三维网格模型上选定邻域内所有顶点的高斯曲率值,选取其中绝对值较大的  $n$  个点;并分别求取这  $n$  个点与初始拾取点间的向量内积,从而获得与初始拾取点间夹角角度最小的拾取点,最终将初始拾取点坐标修正为上述夹角角度最小拾取点的物理坐标。

## 2 脊椎特征点标定

脊椎特征点作为脊椎模型上具有一定特征的局部区域的位置标识,可以表示模型的几何特征以及脊椎的生理特性。目前,国内外在脊椎的特征点定位检测方面研究较少,还没有提出比较权威的脊椎特征点定义和标注方法。本文基于 Cootes<sup>[7]</sup>总结的特征点分类标准,并参考 M. Berrar 在人面部形态学基础上提出的颅面特征点标记方法(Moving Picture Experts Group, MPEG-4)的人脸定义参数(FDP)<sup>[8-10]</sup>,同时结合脊椎生理特性给出了脊椎特征点的定义。下面以脊椎腰椎段为例说明脊椎特征点的定义,图 1 和图 2 分别是脊椎腰椎段特征点定义的右视图和俯视图。



图 1 脊椎腰椎段的右侧面观特征点标记图

Fig. 1 Labeled graph of feature points of the right lateral view of lumbosacral segment



图 2 脊椎腰椎段的上面观特征点标记图

Fig. 2 Labeled graph of feature points of the superior aspect of lumbosacral segment

### 3 利用高斯曲率和向量特征改进人体脊柱模型特征点的标注方法

目前,脊椎模型特征点标注主要采用纯手动标注的方法。由于手动拾取的特征点与真实特征点间存在一定误差,准确性较差,因此本文利用高斯曲率和向量特征来改进人体脊柱模型特征点的标注。由于模型上一点处的高斯曲率值可以反映该点邻域内曲面的弯曲程度和局部模型的变化情况,本文根据高斯曲率的几何意义,曲率值较大的点,该点邻域内曲面的弯曲程度就更大,局部形态变化也更明显,从而表明特征点标注的准确度也就越高。通过手动选取三维模型上一点作为初始

拾取点,以极小半径  $R(0 \leq R \leq 1)$  的球形空间作为拾取点的最大近似邻域,在此基础上遍历点邻域内所有顶点的高斯曲率绝对值,并选取其中值较大的  $n(0 \leq n \leq 3)$  个点。

同时,基于空间模型中向量内积的几何意义,以坐标系原点作为向量起点,分别求取上述曲率值较大的  $n$  个点与初始拾取点之间的向量内积,进而求出这些点中与初始拾取点间夹角角度最小的点,将初始拾取点坐标修正为上述夹角角度最小点的物理坐标,从而使标记结果更趋近于真实的特征点,以此来提高特征点标注的准确度。

#### 3.1 三角网格曲面的高斯曲率的计算

随着三维图像数据采集技术的快速发展,三角网格曲面以其方法简单、处理统一、拓扑适应能力强等特点在计算机三维图像处理领域得到了广泛应用。三角网格曲面模型中的数据主要由顶点和三角片组成,同时可以将模型中顶点表达的信息近似认为是该点局部邻域的形态反映。如图 3 所示,在三角网格曲面中求取点  $x_i$  邻域的高斯曲率,可以将泰森多边形<sup>[11]</sup>内唯一的离散点的高斯曲率值作为该邻域曲率的最大近似表述。依据本文算法思想,先求解拾取点邻域内所有离散顶点的高斯曲率值,求解过程如下:

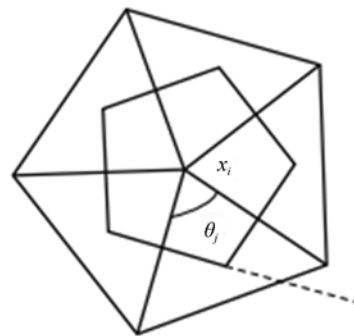


图 3 泰森多边形

Fig. 3 Voronoi diagram

首先,按照如下步骤计算模型上某一离散顶点的泰森多边形区域的面积  $A_M$ :

(1)遍历三维网格曲面模型上的三角面片,获得三角面片中三个顶点的坐标  $v_0$ 、 $v_1$  和  $v_2$ ,并求得其边向量为  $e_0 = v_1 - v_0$ ,  $e_1 = v_2 - v_1$ ,  $e_2 = v_0 - v_2$ ;

(2)将边向量  $(e_1, e_2)$ 、 $(e_2, e_0)$  和  $(e_0, e_1)$  分

别代入向量的点积公式,从而求得三角面片中以该点作为几何顶点的角的角度  $\theta_j$ ,再根据 cell 的拓扑关系,计算离散顶点的相邻三角形中以该离散点为几何顶点的角的角度和  $\sum_{j=1}^{\#f} \theta_j$ ,其中  $\#f$  为离散顶点的相邻三角形的个数;

(3)按下式计算由这三个顶点组成的三角形的面积  $A$ ,同理根据 cell 的拓扑关系可得到离散顶点的相邻三角形的面积  $A_M$ ,如公式(1)所示:

$$A_M = \sum_{j \in N(i)} \frac{1}{2} [\|p_j - p_i\|^2 \|p_{j+1} - p_i\|^2 - (p_j - p_i, p_{j+1} - p_i)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

然后,利用离散微分几何推导公式(2)计算模型上该离散顶点的高斯曲率值:

$$K_G(x_i) = \frac{2\pi - \sum_{j=1}^{\#f} \theta_j}{A_M}, \quad (2)$$

其中上式  $2\pi - \sum_{j=1}^{\#f} \theta_j$  近似表示离散顶点邻域法线映射到单位球上的面积,而  $2\pi - \sum_{j=1}^{\#f} \theta_j$  再除以点的泰森多边形区域的面积,就将该点局部邻域曲面的弯曲程度最终以数据形式表示,即高斯曲率值。

### 3.2 向量内积几何夹角的计算

利用向量内积公式(3)分别计算点邻域内高斯曲率绝对值较大的  $n(0 \leq n \leq 3)$  个点与手动拾取点间的向量内积:

$$p_i \cdot p_0 = x_i x_0 + y_i y_0 + z_i z_0, \quad (3)$$

其中, $O$ 是选定坐标系原点, $p_0$ 是手动拾取点, $p_i$ 是点邻域内高斯曲率绝对值较大的  $n$  个点之一。

在得到向量内积的基础上,利用向量和向量间夹角的关系,可获得两向量间夹角  $\theta$ ,如公式(4)所示:

$$\theta = \arccos \frac{p_i \cdot p_0}{|p_i| |p_0|}. \quad (4)$$

根据向量特征中几何夹角的几何意义,向量间的夹角角度正比于两点间的欧几里得距离。因此,通过比较得出上述  $n$  个点中与手动拾取点夹角角度最小的点,并用此点坐标修正手动拾取特征点的物理坐标,从而使标记结果更趋近于真实的特征点。

当求取结果中出现结果相同,即几何夹角角度相同时,则通过空间距离公式(5)计算两向量间的欧几里得距离,选取距离最小的点为修正后的特征点:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (5)$$

### 3.3 特征点标注改进算法流程

进行人体三维脊椎模型特征点标注主要流程如图 4 所示。

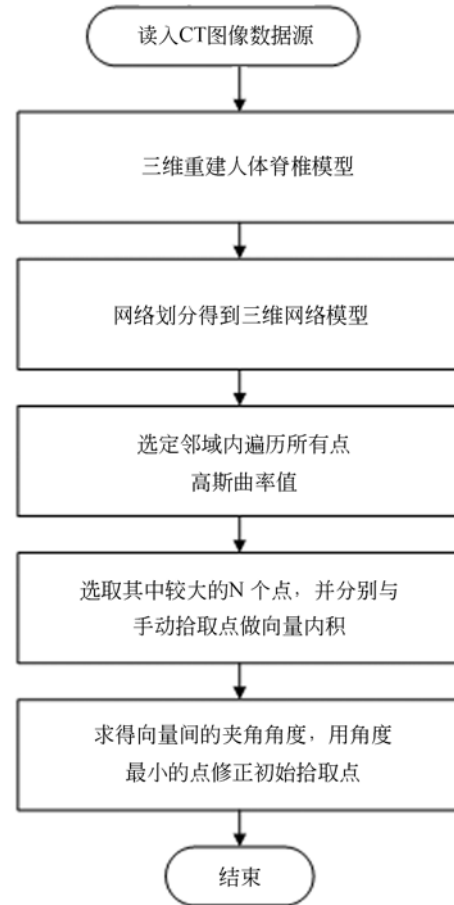


图 4 人体三维脊椎模型特征点标注改进算法流程  
Fig. 4 Improved algorithm flow for feature point labeling of human 3D spine model

主要包括 5 个步骤:

步骤一,以人体脊椎 CT 图像作为数据源,通过三维重建、模型分割等操作后,建立人体脊椎三维模型;

步骤二,对步骤一所建立的脊椎模型进行网格划分,得到特征点标注所需的三维网格模型;

步骤三,手动拾取模型上一点作为初始拾取点,以极小半径  $R(0 \leq R \leq 1)$  的球形空间作为拾取点的最大近似邻域,在此基础上利用上述三维网格曲面上高斯曲率值的计算方法遍历求出点邻域内所有离散顶点的高斯曲率绝对值;

步骤四,选取步骤三中高斯曲率绝对值中较大的  $n$  个点;

步骤五,对步骤四中选取的  $n(0 \leq n \leq 3)$  个点,利用上述向量内积几何夹角的计算方法,即分别求取这  $n$  个点与初始拾取点间的向量内积,进而求出  $n$  个点中与初始拾取点间夹角角度最小的点,最后用此点坐标修正初始拾取点的物理坐标。

### 4 实验结果与分析

本文实验仿真环境如下:CPU 为 Advanced Micro Devices 2.60 GHZ,内存为 4 GB,GUI 为 Microsoft MFC library,开发语言为 VC++,并采用开源的 VTK(Visualization Toolkit)作为图像显示增强库。

经过三维重建,网格划分后得到实验所需的人体脊椎三维网格模型,并分别采用手动拾取的方法和本文提出方法对模型进行特征点的标注。为了使对比更加地鲜明突出,两种方法分别针对 3 种不同类型的代表特征点, No. 1(脊柱模型基点)、No. 7(脊柱模型特征模糊点)和 No. 32(脊柱模型轮廓点)进行标记。图 5 是采用本文提出的方法在 3 种绘制方位下对 No. 1、No. 7、No. 32 特征点标注的效果图,图中标示出对各个特征点进

行算法修正后的特征点坐标、高斯曲率值和几何夹角角度。

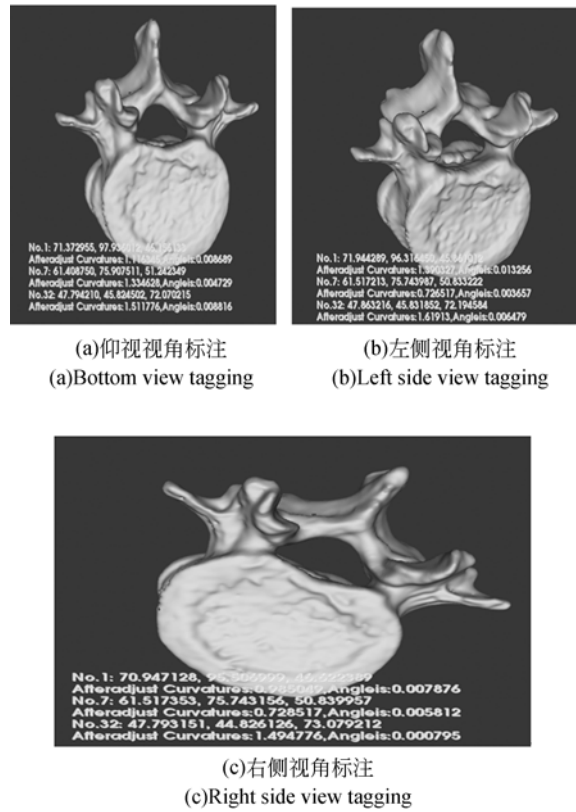


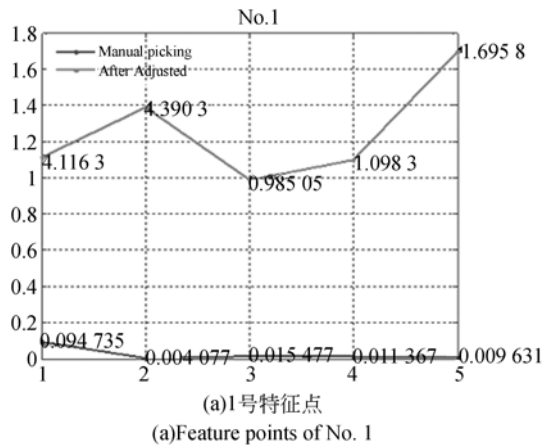
图 5 本文方法的特征点标注效果  
Fig. 5 Feature point tagging by our method

表 1 手动拾取和本方法对 No. 1、No. 7、No. 32 特征点标注的实验数据

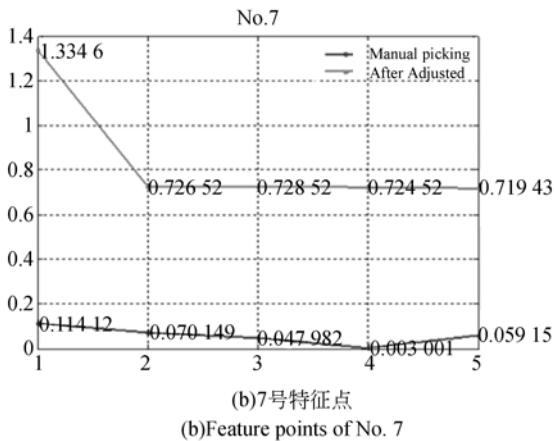
Tab. 1 Tagging for feature points No. 1, No. 7 and No. 32 by manual pick-up and our method

序号	$P(x, y, z)$	高斯曲率	$P'(x, y, z)$	修正后的高斯曲率
1	$P_1(70.325785, 96.274813, 45.665958)$	0.094735	$P'(71.372955, 97.936012, 46.156133)$	1.116345
	$P_2(69.910071, 96.410609, 45.783403)$	0.004077	$P'(71.944289, 96.316450, 45.861012)$	1.390327
	$P_3(70.266380, 95.840355, 46.388554)$	0.015477	$P'(70.947128, 95.506999, 46.622389)$	0.985049
	$P_4(70.263695, 96.276923, 45.862331)$	0.011367	$P'(69.372986, 93.936020, 44.156120)$	1.098345
	$P_5(70.263307, 96.589628, 45.428553)$	0.009631	$P'(68.195251, 94.839355, 42.868443)$	1.695831
7	$P_1(60.111743, 75.112046, 50.452735)$	0.114116	$P'(61.408750, 75.907511, 51.242349)$	1.334628
	$P_2(60.224711, 75.062899, 50.093263)$	0.070149	$P'(61.517213, 75.743987, 50.833222)$	0.726517
	$P_3(61.386371, 75.090877, 49.956783)$	0.047982	$P'(61.517353, 75.743156, 50.839957)$	0.728517
	$P_4(61.032080, 74.875547, 49.837326)$	0.003001	$P'(61.517996, 75.742827, 50.833317)$	0.724517
	$P_5(60.496019, 74.512799, 49.518654)$	0.059150	$P'(61.222831, 75.473342, 50.672358)$	0.719429
32	$P_1(46.980309, 45.096967, 71.899364)$	0.074504	$P'(47.794210, 45.824502, 72.070215)$	1.511776
	$P_2(47.118976, 45.105211, 72.027366)$	0.031067	$P'(47.863216, 45.831852, 72.194584)$	1.61913
	$P_3(47.406289, 44.500498, 72.079623)$	0.004911	$P'(47.793151, 44.826126, 73.079212)$	1.494776
	$P_4(47.663567, 44.973334, 72.358964)$	0.032788	$P'(47.964732, 45.077369, 72.569516)$	1.848617
	$P_5(47.658365, 45.277289, 72.381660)$	0.177850	$P'(48.986033, 46.608821, 73.795215)$	1.884813

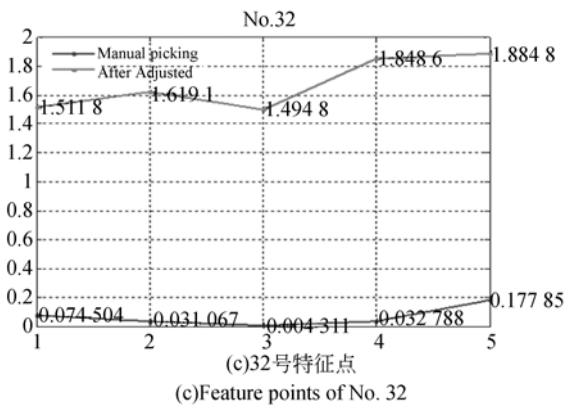
为了更好地显示对比效果,采用上述两种方法分别对各特征点进行 5 次标注并记录实验数据。表 1 中的数据分别是手动拾取的特征点坐标  $P$  和对应的高斯曲率绝对值以及应用本文所提出的方法修正后的特征点坐标  $P'$  和修正后点的高斯曲率绝对值,并将改进前后拾取点高斯曲率值的变化以折线图的形式给出,如图 6 所示。



(a)Feature points of No. 1



(b)Feature points of No. 7



(c)Feature points of No. 32

图 6 改进前后高斯曲率值变化对比

Fig. 6 Contrast of Gaussian curvature value changes

根据表 1 和图 6 中的实验结果,可以看出,标记的特征点中模型基准点(如 No. 1)与模型特征模糊点(如 No. 7)相比,前者特征点处的高斯曲率值通常更大;而对于采用两种方法标注同一个特征点来说,应用本文提出的方法修正后的特征点处的高斯曲率值也均明显大于手动拾取点的高斯曲率值。由高斯曲率的几何意义可得,按照本文提出的方法标注的特征点处邻域曲面的弯曲程度更大,局部形态变化更明显。因此,对比手动拾取特征点,本方法提高了特征点标注的准确性。

为了进一步验证本文提出方法在动态调整拾取点方面的优势,同样将文献[6]所提出的标注算法与本文提出的方法进行对比实验,其中文献[6]算法对各特征点标注的实验效果如图 7 所示,具体实验数据结果如表 2 所示,并将两种方法下得到的几何夹角的变化以折线图的形式示于图 8 中。

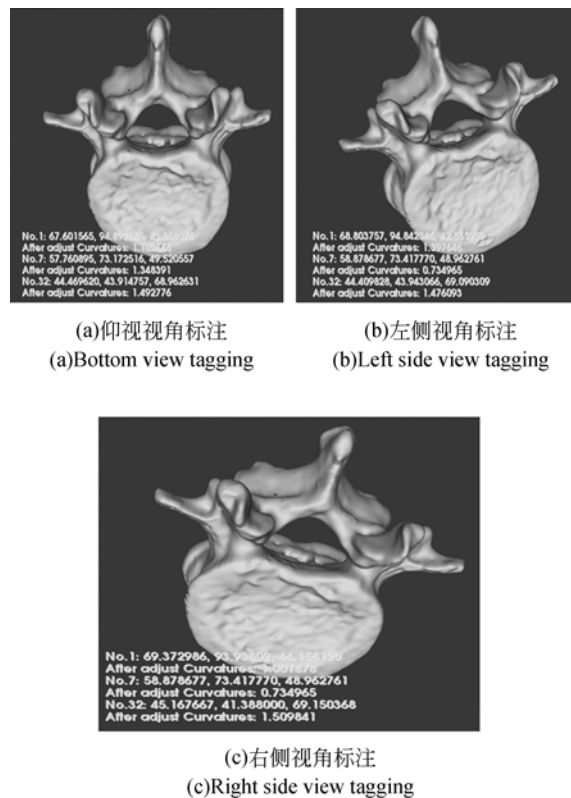


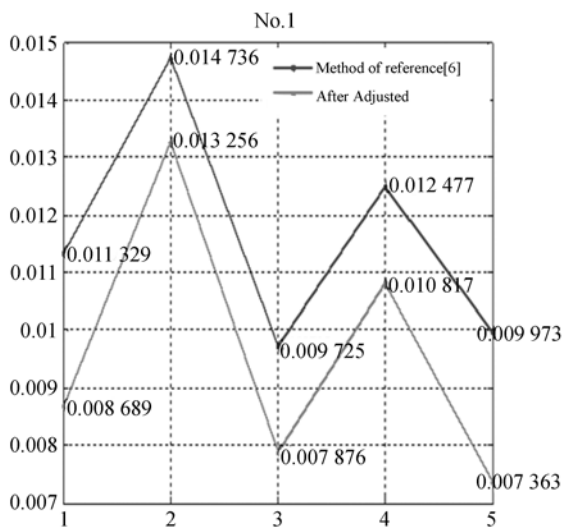
图 7 文献[6]算法的特征点标注效果

Fig. 7 Feature point tagging analysis of reference [6] algorithm

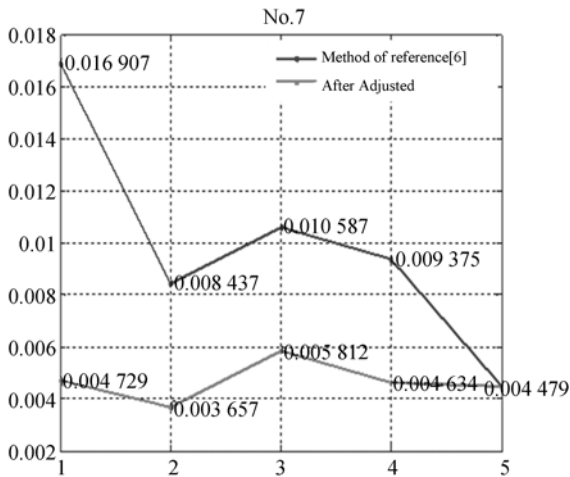
表 2 文献[6]和本方法对特征点 No. 1、No. 7、No. 32 的标注实验数据

Tab. 2 Tagging of feature points No. 1, No. 7 and No. 32 by the method of reference [6] and this method

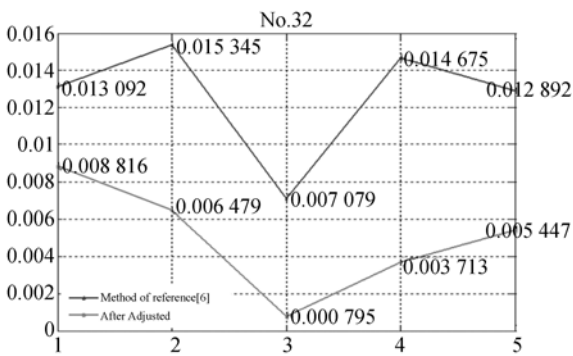
序号	$P(x, y, z)$	文献[6]的 $P'(x, y, z)$	文献[6] 的高斯 曲率流	文献[6] 的夹角 角度/ $^{\circ}$	本方法修 正后的 $P'(x, y, z)$	本方法修 正后的高 斯曲率流	本方法修 正后的夹 角角度/ $^{\circ}$
1	$P_1(70.325\ 785,$ 96.274 813,45.665 958)	$P'(69.601\ 512,$ 96.892 896,45.853 094)	1.104 646	0.011 329	$P'(71.372\ 955,$ 97.936 012,46.156 133)	1.116 345	0.008 689
	$P_2(69.910\ 071,$ 96.410 609,45.783 403)	$P'(70.803\ 127,$ 96.842 916,44.855 339)	1.399 646	0.014 736	$P'(71.944\ 289,$ 96.316 450,45.861 012)	1.390 327	0.013 256
	$P_3(70.266\ 38,$ 95.840 355,46.388 554)	$P'(71.372\ 289,$ 95.936 320,46.156 180)	1.003 878	0.009 725	$P'(70.947\ 128,$ 95.506 999,46.622 389)	0.985 049	0.007 876
	$P_4(70.263\ 695,$ 96.276 923,45.862 331)	$P'(68.944\ 972,$ 96.316 430,44.863 212)	1.010 327	0.012 477	$P'(69.372\ 986,$ 93.936 020,44.156 120)	1.098 345	0.010 817
	$P_5(70.263\ 307,$ 96.589 628,45.428 553)	$P'(68.946\ 977,$ 96.316 721,44.868 987)	1.704 765	0.009 973	$P'(68.195\ 251,$ 94.839 355,42.868 443)	1.695 831	0.007 363
7	$P_1(60.111\ 743,$ 75.112 046,50.452 735)	$P(59.760\ 945,$ 75.172 896,51.522 357)	1.350 321	0.016 907	$P(61.408\ 750,$ 75.907 511,51.242 349)	1.334 628	0.004 729
	$P_2(60.224\ 711,$ 75.062 899,50.093 263)	$P'(58.878\ 677,$ 73.417 770,48.962 761)	0.734 965	0.008 437	$P'(61.517\ 213,$ 75.743 987,50.833 222)	0.726 517	0.003 657
	$P_3(61.386\ 371,$ 75.090 877,49.956 783)	$P'(58.878\ 677,$ 73.417 770,48.962 761)	0.734 965	0.010 587	$P'(61.517\ 353,$ 75.743 156,50.839 957)	0.728 517	0.005 812
	$P_4(61.032\ 080,$ 74.875 547,49.837 326)	$P'(58.878\ 677,$ 73.417 770,48.962 761)	0.734 965	0.009 375	$P'(61.517\ 996,$ 75.742 827,50.833 317)	0.724 517	0.004 634
	$P_5(60.496\ 019,$ 74.512 799,49.518 654)	$P'(59.225\ 231,$ 73.472 542,48.676 968)	0.717 429	0.004 479	$P'(61.222\ 831,$ 75.473 342,50.672 358)	0.719 429	0.004 479
32	$P_1(46.980\ 309,$ 45.096 967,71.899 364)	$P'(44.469\ 620,$ 43.914 757,68.962 631)	1.492 776	0.013 092	$P'(47.794\ 210,$ 45.824 502,72.070 215)	1.511 776	0.008 816
	$P_2(47.118\ 976,$ 45.105 211,72.027 366)	$P'(44.409\ 828,$ 43.943 066,69.090 309)	1.476 093	0.015 345	$P'(47.863\ 216,$ 45.831 852,72.194 584)	1.619 13	0.006 479
	$P_3(47.406\ 289,$ 44.500 498,72.079 623)	$P'(45.167\ 667,$ 41.388 000,69.150 368)	1.509 841	0.007 079	$P'(47.793\ 151,$ 44.826 126,73.079 212)	1.494 776	0.000 795
	$P_4(47.663\ 567,$ 44.973 334,72.358 964)	$P'(44.627\ 914,$ 43.753 708,69.364 044)	1.850 723	0.014 675	$P'(47.964\ 732,$ 45.077 369,72.569 516)	1.848 617	0.003 713
	$P_5(47.658\ 365,$ 45.277 289,72.381 66)	$P'(44.467\ 278,$ 43.749 367,69.313 614)	1.893 074	0.012 892	$P'(48.986\ 033,$ 46.608 821,73.795 215)	1.884 813	0.005 447



(a)1号特征点  
(a)Feature points of No. 1



(b)7号特征点  
(b)Feature points of No. 7



(c)32号特征点  
(c)Feature points of No. 32

图 8 两种方法下几何夹角的变化对比

Fig. 8 Comparison of geometric angle change

从表 2 和图 8 可以得到,针对实验中各类特征点来说,在确保点邻域内取得尽可能大的高斯曲率值的基础上,应用本文提出的方法所得到的几何夹角角度相比采用文献[6]中方法所得到的夹角角度都要明显趋小。由向量内积的几何意义可知,向量间的夹角角度越小,代表两点之间欧几里得距离越靠近,从而表明新方法标注的点更趋于聚集,更能逼近实际的特征点信息。因此表明,本方法标注的特征点更趋近于真实的特征点。

### 5 结 论

本文首先对脊椎特征点做出定义,接着根据三维模型某点处的高斯曲率值及向量内积的几何意义,提出了一种利用高斯曲率和向量特征改进人体脊柱模型特征点的标注方法。从上述实验结果可得,采用所提法,修正后的标注点高斯曲率值明显更大,根据曲率的几何意义得知,曲率越大,该点邻域内曲面的弯曲程度就更大,其局部形态变化也更明显,从而表明本方法标注的特征点准确度也就越高。另外通过与文献[6]方法的对比实验可知,在确保取得邻域内尽可能大的高斯曲率值的同时,本方法改进后得到的几何夹角更小,标记结果更趋近于真实的特征点。经过对上述实验数据的加权计算得知,采用本文提出的方法,与文献[6]方法相比,定位脊椎模型特征点的准确度约提高 29%,尤其是针对模型中特征较模糊的点(如 No. 7),修正后的特征点改进效果更好。总之,本文提出的方法进一步提高了脊椎特征点标注的准确性,降低了人为原因造成的误差,为合理诊断和术后评估及康复提供了准确的数据依据。

## 参考文献:

- [1] SMITH S M, BRADY J M, SUSAN. A new approach to low level image processing[J]. *International journal of computer vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [2] LOWE D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International journal of computer vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [3] 李康, 尚鹏, 耿国华, 等. 基于深度图像的人脸模型特征点自动标定[J]. *计算机科学*, 2014, 41(4): 287-291.  
LI K, SHANG P, GENG G H, *et al.*. Automatic calibration of feature points based on depth image [J]. *Computer Science*, 2014, 41(4): 287-291. (in Chinese)
- [4] 刘倩, 耿国华, 周明全, 等. 基于三维点云模型的特征线提取算法[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(3): 933-937.  
LIU Q, GENG G H, ZHOU M Q, *et al.*. Feature line extraction algorithm based on 3D point cloud model [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(3): 933-937. (in Chinese)
- [5] 徐毅. 基于高斯曲率极值点的散乱点云数据特征点提取[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(9): 2341-2344.  
XU Y. Feature point extraction of scattered point cloud data based on Gaussian curvature extreme point point [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(9): 2341-2344. (in Chinese)
- [6] 韩霜. 三维脊椎模型特征点标注的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
HAN SH. *Research and implementation of tagging three-dimensional model of the spine with feature points*[D]. Xi'an: Xidian University, 2013 (in Chinese)
- [7] Jing, Simon Baker, Iain Matthew, Takeo Kanade. Real-time combined 2D + 3D active appearance model[J]. *Proceeding of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004 27(2): 535-542.
- [8] 李华明. 基于中国人脸面貌形态学特征的人脸姿态估计方法研究[D]. 西北大学, 2005.  
LI H M. *Study on face phenomenon estimation method based on morphological features of chinese face facsimile* [D]. Northwest University, 2005. (in Chinese)
- [9] 谢易辰, 陈健, 等. 三维特征点距离特征集求交匹配方法[J]. *红外与激光工程*, 2014(08). 25-31.  
XIE Y CH, CHEN J, *et al.*. Distance feature set intersection for 3D feature matching. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014(08). 25-31. (in Chinese)
- [10] 王澜, 孙博, 等. 一种基于共线特征点的线阵相机内参标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2015(06). 134-140.  
WANG L, SUN B, *et al.*. A novel method for calibrating intrinsic parameters of linear array cameras based on collinear feature points. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015(06). 134-140. (in Chinese)
- [11] 陈维桓. 微分几何. 北京大学出版社. 2006, 06, 01. CHEN W H. *Differential geometry*. Peking University Press. 2006, 06, 01.  
CHEN W Y. *Differential Geometry*. Peking University Press. 2006, 06, 01. CHEN W H. *Differential geometry*. Peking University Press. 2006, 06, 01. (in Chinese)

## 作者简介:



鱼 滨(1963—),男,陕西西安人,西安电子科技大学计算机学院教授,硕士生导师。主要研究领域为医学影像处理、软件工程、虚拟现实。Email: yubin@mail.xidian.edu.cn

## 通讯作者:



惠 宇(1984—),男,陕西岐山人,博士研究生,2009年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事医学影像处理、软件工程、有限元计算的研究。E-mail: 289178013@qq.com