口腔研究 DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.000220

下颌骨轮廓曲线拟合寻曲率最大定位下颌角的研究

孙 露,幸 宇,单改仙,江 正,贺向前
(重庆医科大学基础医学院法医学与生物医学信息研究室,重庆 400016)

【摘 要】**目的**:人体颅骨中的下颌角与颏下点在法医学鉴定、牙科手术、整形美容等领域具有重要作用,如何在锥形束(cone bean,CB)CT 下颌骨图像上进行下颌角点与颏下点的定位对法医学鉴定和术前准备非常关键。**方法**:首先对 265 幅 CBCT 下颌骨图像进行形态学处理并提取下颌骨外轮廓线,然后采用 5 次方程进行曲线拟合以寻找曲率最大点的方法提取左右下颌角点与颏下点,最后通过距离相关性检验,对定位结果进行客观评价。**结果**:实验数据显示,右下颌角点到颏下点的距离与左下颌角点到颏下点的距离具有良好相关性,距离相关性检验系数为 r=0.955。**结论**:采用曲线拟合寻找曲率最大点的方法可以准确自动地定位 CBCT 下颌骨图像的左右下颌角点。

【关键词】锥形束 CT;下颌骨;下颌角;曲线拟合;距离相关性
【中图分类号】R89;TP391 【文献标志码】A 【收稿日期】2013-11-07

Research on location of gonion by finding maximum curvature in curve-fitting of mandible contour

Sun Lu, Xing Yu, Shan Gaixian, Jiang Zheng, He Xiangqian
(*Forensic Medicine and Biomedical Informatics Research Room, College of Basic Medicine, Chongqing Medical University*)

【Abstract】***Objective***: The gonion and gnathion of human skull play an important role in forensic identification, dental surgery, cosmetic surgery and other fields. It is critical to locate them in cone bean(CB) CT mandible image for forensic identification and preoperative preparation. ***Methods***: In this paper, an effective method was proposed to position gonion of mandible accurately and automatically. Firstly, 265 CBCT mandible images were processed to extract the outer contour of lower jawbone by mathematics morphology method. Then quintic polynomial equations were carried out to gain fitted curves of mandible contours which were used to find the maximum curvature points. Lastly, distance correlation coefficient was computed to evaluate the accuracy of location of gonion objectively. ***Results***: Data showed that the distance between right and left gonion point to gnathion point had good correlation and the distance correlation coefficient was r=0.955. ***Conclusion***: Finding the maximum curvature point with curve-fitting is an effect way to position the gonion in the CBCT mandible image.

【Key words】cone beam CT; mandible; gonion; curve fitting; distance correlation

颅骨下颌角点和颏下点的自动定位与测量在法医学的颅相重合、整形美容和牙科手术导航等领域具有重要的参考价值。颅骨下颌角点和颏下点特征是人体生物特征的一部分,颅骨特征与现有的指纹识别技术、面部识别技术等所采用的外部特征相比[1-3],具有更强的内部稳定性和不易破坏性,且成年人颅骨不随年龄和体重的变化而发生突变,受环境因素影响较小,人为改变的难度大,因此研究颅骨特征具有重要的意义[4-5]。

下颌角是面颅骨的一对重要特征点,在下颌骨图像上自动且准确的定位下颌角点是颅相重合技术与图像匹配的关键步骤。在法医人类学中结合其他信息进行影像重叠检验,可以对无名尸骸进行身份鉴定,为侦破案件提供线索[6]。同时,在下颌骨手术导航中,精确定位下颌角可以帮助医生对病人的病情进行正确评估和制定相应的手术计划[7]。所以研究下颌角在下颌骨图像上的定位方法非常必要。

基于对下颌骨中下颌角点定位的需求,提出一种采用曲线拟合寻找曲率最大点的方法对锥形束(cone bean,CB)CT 下颌骨图像自动提取左右下颌角点和颏下点,并通过左右下颌角点与颏下点的像素距离进行距离相关性检验,对提取效果进行客观评价。

作者介绍:孙 露,Email:sundew2012@163.com,研究方向:医学图像处理。
通信作者:贺向前,Email:hexiangqian@gmail.com。
基金项目:重庆市科委资助项目(编号:cstc2013yykfA10013);重庆市渝中区科委资助项目(编号:20120305)。
优先出版:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13406/j.cnki.cyxb.000220.html

1 资料与方法

1.1 实验数据

原始数据收集于重庆医科大学附属口腔医院，样本对象为 6~70 岁年龄段牙病患者，在征得患者及其家属同意的前提下，采集样本 265 例，其中不包括具有下颌骨外伤史的患者。实验中涉及的 CBCT 下颌骨图像（图 1）是通过处理软件“KaVo eXam Vision”将原始数据（DICOM 文件格式）进行转化后得到的平面图像。

下颌骨特征点包括颏下点和左右下颌角点均分布在下颌骨外轮廓上，如图 2 所示，其中点 A、B 和 C 分别代表下颌骨的右下颌角点、左下颌角点和颏下点。所有 CBCT 下颌骨图像的下颌骨外轮廓均位于图像横轴中心线以下，即图像的下 1/2 区域内，所以为了提高计算机处理速度并去除噪声干扰，只截取并处理 CBCT 图像下 1/2 区域图像，即 h-CBCT（half-cone beam CT）图像。



图 1 CBCT 下颌骨图像

Fig.1 Cone Beam CT mandible image

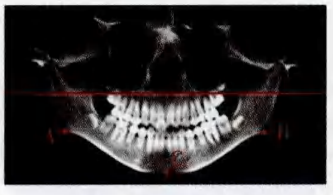


图 2 标注下颌角点与颏下点的样本图像

Fig.2 Sample image of the marked gonion and gnathion points

1.2 实验方法

1.2.1 对 h-CBCT 图像使用数学形态学预处理 数学形态学应用于图像可以简化图像数据，保持他们基本的形状特性，并除去不相关的结构[8]。用数学形态学处理后的 h-CBCT 图像可以突出显示轮廓边界，便于之后的边缘提取工作。以图 2 为例，经过数学形态学预处理后的效果如图 3。



图 3 数学形态学处理效果图

Fig.3 Image after mathematical morphology

1.2.2 提取下颌骨外轮廓线 下颌骨外轮廓线的提取由 Canny 边缘检测算子实现[9]。实验中通过对比总结得出对经过数学形态学预处理后的 h-CBCT 图像设置参数阈值为 0~0.25 时最佳，提取的下颌骨外轮廓线完整连续且没有其他干扰噪声曲线，如图 4 所示。



图 4 提取下颌骨外轮廓线效果图

Fig.4 Image of the mandible outer contour

1.2.3 提取特征点 下颌骨的右下颌角点、左下颌角点和颏下点，分别位于轮廓线的左、右、中区域。所以在提取特征点前先将下颌骨外轮廓线图像 3 等分（图 5），再分别进行特征点提取。



图 5 3 等分下颌骨外轮廓线图

Fig.5 Image of trisection of the mandible out contour

1.2.3.1 根据面颅骨对称原理寻找颏下点 通过提取中线与轮廓线的交点即可定位颏下点，结果如图 6 所示。

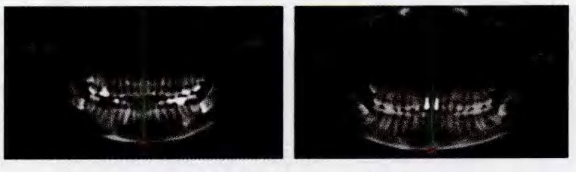


图 6 CBCT 下颌骨图像呈中线对称示意图

Fig.6 Symmetric centerline showed by cone beam CT images

1.2.3.2 通过拟合曲线寻找曲率最大点来定位下颌角点 CBCT 下颌骨图像的外轮廓线上靠近下颌底端弯曲程度最大的点即为下颌角点。通过曲线拟合下颌骨轮廓线，然后采用寻找曲率最大点的方法来定位下颌角，步骤如下：

（1）对轮廓线进行多项式曲线拟合。曲线拟合是指用连续曲线近似地刻画或比拟平面上离散点组所表示的坐标之间的函数关系，由此可描绘其变化曲线并计算出两组数据之间的函数关系[10-11]。实验数据表明，针对下颌骨轮廓线的拟合选择 5 阶多项式效果较好。对图 5 中的右下颌骨轮廓线（即左区域图像）采用曲线拟合，结果如图 7 所示，y_2 的拟合公式为：

$$y_2=9.82\times10^{-8}x^5-7.85\times10^{-5}x^4+0.02x^3-3.86x^2+297.09x-8.9\times10^{-3}$$

用决定系数 R^2 来衡量拟合效果，其计算公式为：

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y}_i)^2} \qquad 1-1$$

其中 y_i 为原曲线、y 轴坐标值，$\hat{y}_i$ 为拟合曲线 y 轴坐标值，$\bar{y}_i$ 为拟合曲线 y 轴坐标平均值。经计算，该拟合曲线的 R^2=0.998 4，拟合优度高，说明拟合效果非常好。

(2)对拟合曲线求解曲率。由曲率公式：

$$K=\frac{|y''|}{(1+y'^2)^{2/3}} \qquad 1-2$$

计算出拟合曲线的曲率。其中 y'，y'' 分别为函数 y 对 x 的一阶导数和二阶导数。由图 7 的 3 条曲线可以看出，曲率曲线最大值所对应的点就是下颌角点（说明：这 3 条曲线虽然具有相同的 x 坐标系，但是 y 坐标系是不同的，为了方便观察对比，将图中 y_2 与 y_3 进行了适当的拉伸变换）。

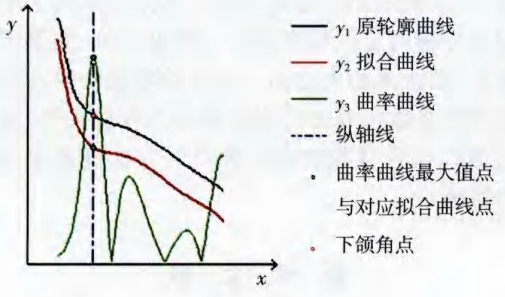


图 7 轮廓曲线、拟合曲线与曲率曲线对比图

Fig.7 Comparison chart of contour curve, fitting curve and curvature curve

(3)抑制图像 2 个端点产生的突变曲率。在进行高阶曲线拟合时，经常会在拟合曲线的 2 个端点出现大的波纹现象，这种现象在曲率分布图上表现为在 2 个端点处出现突变曲率，即曲率值异常偏大，直接影响正确最大曲率点的定位，如图 8 中灰色区域所示。右下颌角拟合曲线近下颌底端一般都会产生曲率突变，个别则会在远下颌底端产生曲率突变，所以根据曲率曲线的波段性特点首先去除最右边波段（无论是否为曲率突变段），然后根据曲率突变的不连续性判断最左边波段是否为曲率突变段，如果是，同样去除。最后得到的曲率曲线图，如图 9 所示。

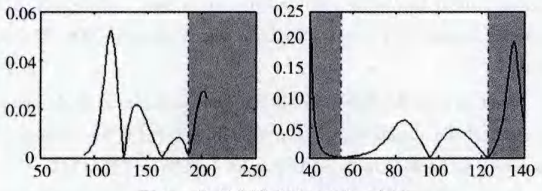


图 8 曲率曲线突变区域示意图

Fig.8 Image of sharp curvature

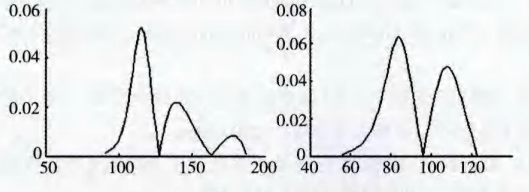


图 9 抑制突变曲率后的曲率图像

Fig.9 Curvature image after suppressing sharp curvature

(4)寻找拟合曲线上曲率最大点。因拟合曲线与轮廓曲线有相同的 x 坐标系，故将拟合曲线中最大曲率点的 x 坐标映射到轮廓曲线上并求得 y 坐标，则坐标点[x,y]即为所求下颌角点坐标。如图 10 所示，其中 2 边红色圆圈标注的为左右下颌角特征点，中间绿色圆圈标注的为颏下特征点。



图 10 特征点提取效果图

Fig.10 Effect image of feature points

1.2.4 特征点距离计算 同一幅图像的左右下颌角点与颏下点均提取后，据两点间距离公式分别求得右下颌角点到颏下点的像素距离（right distance，RD）和左下颌角点到颏下点的像素距离（left distance，LD）。同时，对获得的 265 组 RD 和 LD 采用距离相关性对定位进行客观评价。

2 结 果

2.1 拟合曲线与原轮廓曲线的拟合优度分析

图 11 是对 265 幅 CBCT 下颌骨图像进行轮廓提取后，采用曲线拟合与原轮廓曲线进行拟合优度分析的统计柱状图，右拟合曲线决定系数 R^2 平均值达到 0.983，左拟合曲线决定系数 R^2 平均值达到 0.984，说明拟合度相当高，如表 1 所示。

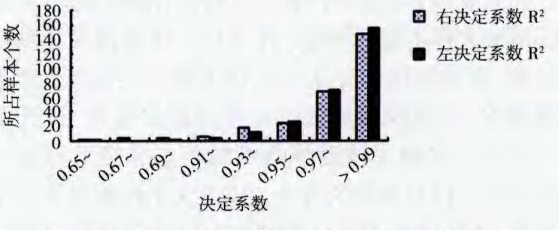


图 11 拟合曲线与原轮廓线的拟合优度分析图

Fig.11 Coefficient determination between fitting curve and contour curve

表 1 拟合曲线与原轮廓线拟合优度统计描述

Tab.1 Description of goodness of fit between fitting curve and contour curve

	右决定系数 R^2	左决定系数 R^2
最大值	0.999 6	0.999 7
最小值	0.850 7	0.855 5
平均值	0.983 5	0.984 0

2.2 下颌角点的定位与位置精确性分析

6 例实验数据，包括左右下颌角点坐标、颏下点坐标以及 RD 与 LD（由于篇幅限制，265 组数据不一一显示）（表 2）。

表 2 6 例样本数据

Tab.2 Data of 6 samples

样本序号	颏下点坐标[x,y]		右下颌角坐标[x,y]		左下颌角坐标[x,y]		RD	LD
1	321	325	117	281	524	287	208.691	206.526
2	295	316	96	275	487	288	203.179	194.030
3	339	293	138	267	557	267	202.674	219.545
4	329	298	81	270	576	263	249.575	249.467
5	309	317	115	241	497	243	208.355	202.039
6	301	331	101	244	502	244	218.103	219.020

目前判断定位精确性还没有金标准，但是根据下颌骨左右基本对称或近似对称原理，如定位精确，则 RD 和 LD 距离相关性较高。实验中采用距离相关性对 265 个 RD 和 LD 进行统计分析，如表 3 所示，得到距离相关性系数 r=0.955，表明 RD 与 LD 具有高度相关性，符合定位精确的一个特征。

表 3 LD 与 RD 的距离相关性

Tab.3 Correlation distance between LD and RD

	近似矩阵	
	值向量间的相关性	
	RD	LD
RD	1.000	0.955
LD	0.955	1.000

3 讨 论

数年来颅骨标记定位的方法有了很大的发展，常见的体表解剖定位标记法相对成熟，但是容易受个人主观因素的影响，缺乏自动性，准确度低，且不适用于大样本量的测量。本文以人体面颅骨为测量对象，在传统体表标志定义的基础上，结合了计算机视觉、图像处理和数学计算等现代技术，设计了一种用于实现人体面颅骨下颌角点和颏下点标志的自动定位与测量的方法。该方法不仅提高了工作效率，还还提高了定位的精度，从而使测量更精确，提取的特征参数更可靠，在法医学的颅骨身份识别中，特别是对其他颅骨特征不全的无名尸骸，或者是破碎颅骨的身份识别上具有重要研究意义。同时，该方法在颅骨图像配准、整形美容和牙科手术等领域也具有较大应用价值。

采用曲线拟合的方式寻找曲率最大点的方法能够自动的定位面颅骨下颌角点和颏下点等重要特征点，特别是对大量颅骨图像进行处理并提取特征点建立法医学数据库时，计算机自动定位将减少大量的人工工作量，提高工作效率。该方法的最大难点在于曲线拟合，实验表明对下颌骨轮廓曲线采用 5 次多项式拟合，决定系数平均值达到 0.98 以上，说明拟合优度非常好。拟合曲线上曲率最大点映射到下颌骨轮廓曲线上就是变化最尖锐的点，即变化最尖锐的下颌角点，因此通过这种方式能够巧妙定位到左右下颌角点，而颏下点定位相对简单，为中心线与下颌骨轮廓曲线的交点。同时，定位精度是评判定位方法优劣的另一重要指标，由于面颅骨特征提取主要应用在医学领域，应用面相对狭窄，参与研究人员相对较少，还未形成定位精度的金标准，定位精度评价方法也较少，由于大多数面颅骨呈左右对称，因此颏下点到左右下颌角点的距离应近似相等，所以曲线拟合寻曲率最大的方法采用了距离相关性分析对定位精度进行了客观评价，如果定位精度高，则距离相关性高。而实验数据获取到的距离相关性系数为 0.955，说明具有高度相关性，表明通过曲线拟合寻找曲率最大点的方法具备定位精确的特征。

参 考 文 献

[1] Ogorman L.Comparing Passwords, tokens, and biometrics for user authentication[J].Proceedings of the IEEE, 2003, 91(12): 2019-2020.

[2] Yang MH, David JK.Detecting faces in images: A survey[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 34-58.

[3] Jie T, Liang L, Xin Y.Fingerprint-based identity authentication and digital Media protection in network environment[J].Journal of Computer Science and Technol, 2006, 21(5): 861-870.

[4] 李海岩，阮世捷，彭 翔，等.基于 CT 图像的活体人颅骨几何特征的研究[J]. 中国生物医学工程学报，2007，26(6)：946-950.

[5] Yuru P, Hongbin Z, Zhong BY.The Craniofacial Reconstruction from the local structural diversity of skulls[J].Computer Graphics Forum, 2008, 27(7): 1711-1718.

[6] Ricci A, Marella GL, Apostol MA.A new experimental approach to computer-aided face/skull identification in forensic anthropology[J]. American Journal of Forensic Medicine and Pathology, 2006, 27(1): 46-49.

[7] Wang Q, Chen H, Wu W, et al.Real-time mandibular angle reduction surgical simulation with haptic rendering[J].IEEE transactions on information technology in biomedicine, 2012, 16(6): 1105-1114.

[8] Maragos P.Differential morphology and image processing[J].IEEE Trans Image Processing, 1996, 5(6): 922-937.

[9] Canny J.A computational approach to edge detection[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.

[10] 《现代应用数学手册》编委会.现代应用数学手册-计算与数值分析卷[M].北京：清华大学出版社，2005：86-128.

[11] 赵文彬，杨福增，张艳宁.基于多项式拟合的颅骨特征识别[J].北京生物医学工程，2007，26(5)：454-457.

（责任编辑：关蕴良）