❖医学物理与工程学

Motion characteristics of cervical spine based on continuous images

PEI Xinxin[1], *LUO Sipin*[2], *WAN Yeda*[2], *WANG Xuemin*[1,3], *ZHOU Peng*[1,3*]

(1. *School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering of Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*; 2. *Department of Radiology, Tianjin Hospital, Tianjin* 300211, *China*; 3. *Tianjin Key Laboratory of Biomedical Testing Technology and Instruments, Tianjin* 300072, *China*)

[**Abstract**] **Objective** To explore the motion features of cervical spine based on continuous X-ray images. **Methods** The cervical spontaneous continuous multi-frame sagittal images from flexion to extention positions were selected from cervical spondylosis patients (patients group) and healthy adult (normal group). After preprocessing and registration, the trajectory of single vertebral body were recorded, and the feature points of each vertebral body were extracted. Meanwhile, the relative geometry parameters and movement rate were calculated. **Results** The motion trajectory of patients' cervical spine C4—6 were different from healthy people. The angles between the left edge curve of the vertebral body (C4 and C5 vertebra) and the baseline of patients group were smaller than those of normal group in flexion position (all $P<0.05$). There were instability in the movement of C4 vertebral body in patient group, and the volatility of the angle change, the rate of change and the frequency were larger. The relative position change of the adjacent single vertebral body in the patient group are smaller. **Conclusion** Through the preprocessing, registration, parameter extraction and result analysis, the changes of functional features in cervical spondylosis patients are truly reflected. And it also provides a new idea for dynamic analysis of cervical vertebrae based on X-ray images.

[**Key words**] Cervical vertebral; Dynamic characteristics; Movement speed; Single vertebral body motion

DOI: 10.13929/j.1003-3289.201610065

基于连续成像的颈椎运动特征

裴欣欣[1], 罗嗣频[2], 万业达[2], 王学民[1,3], 周　鹏[1,3*]

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津　300072; 2. 天津医院放射科, 天津　300211; 3. 天津市生物医学检测技术与仪器重点实验室, 天津　300072)

[**摘　要**] **目的**　在获取 X 线颈椎屈伸运动连续图像的基础上探讨颈椎的运动特征。**方法**　对颈椎病患者及正常人颈椎过屈位至过伸位自发连续运动的多帧矢状位 X 线图像进行图像预处理、配准后, 记录单椎体的运动轨迹, 提取各椎体的特征点, 并计算出活跃椎体的相对几何学参数、运动速率。**结果**　患者组与正常组 C4、5、6 椎体动态轨迹不同。与正常组比较, 过屈位时患者组 C4、5 椎体左侧边缘曲线与基准线的夹角较小(P 均<0.05)。患者组 C4 椎体的运动存在不稳定性, 角度变化的波动性、速率改变的幅度及频率均较大。且患者组相邻单椎体相对位置的改变更小。**结论**　通过本研究图像预处理、配准、参数提取及结果分析方法, 可真实反映颈椎病变带来的功能学特征改变, 为基于 X 线图像的颈椎动态特征分析提供新思路。

[**关键词**] 颈椎; 动态特征; 运动速率; 单椎体运动

[**中图分类号**] TP391.5　[**文献标识码**] A　[**文章编号**] 1003-3289(2017)07-1090-05

[**第一作者**] 裴欣欣(1991—), 女, 河北邢台人, 在读硕士。研究方向: 医学图像处理。E-mail: peixx@tju.edu.cn

[**通信作者**] 周鹏, 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 300072; 天津市生物医学检测技术与仪器重点实验室, 300072。E-mail: zpzp@tju.edu.cn

[**收稿日期**] 2016-10-17　[**修回日期**] 2017-04-10

传统的颈椎病检查多采用 X 线进行形态学特征分析[1-2]，而颈椎病初期是功能性的，静态观察不能很好地反映其特征。以往通过有限元法[3]可追踪到静态图像椎体边缘，基于双目立体视觉的颈椎运动测量[4]、光学追踪[5]和电磁追踪[6-7]等均依赖于外部标记运动追踪，所得数据误差较大。Anderst 等[8]将直径 1.6 mm的钛珠植入研究对象的椎体和棘突内以获取椎体运动特征，但方法具有侵入性。叶斌[9]通过摄取颈椎张口位、左右旋转后张口位研究颈椎的动态运动。但此类研究多采用不同位置的静态矢状位图像，分别对图像进行测量分析，其动态特征不明显。本研究通过训练受试者自主完成颈椎屈伸运动，选取颈椎过屈位至过伸位自发连续运动的多帧矢状位 X 线图像，经预处理、配准后，提取颈椎椎体特征点，通过与相邻图像的连续处理，描绘每一椎体的整体运动的轨迹，计算椎体运动速率，分析感兴趣椎体动态功能特征和相邻两椎体在运动过程中相对位置的改变，以期更真实地反映颈椎病变引起的颈椎动态功能的改变，进一步加深对生理载荷下颈椎运动状况的认识。

1　试验流程

在获取颈椎屈伸运动连续图像的基础上，对图像进行预处理，以增强颈椎的结构，提取出每一椎骨的特征点。由于受试者进行颈椎屈伸运动时，C7 椎体常被遮挡，X 线图像中难以区分，为清楚地了解各椎骨的相互关系，以 C6 椎体图像进行配准处理。完成上述处理后，对相邻的图像进行参数提取和计算，分析正常人群与颈椎病患者颈椎运动速率的改变，并记录单椎体的运动轨迹和相对位置的变化，试验流程见图 1。

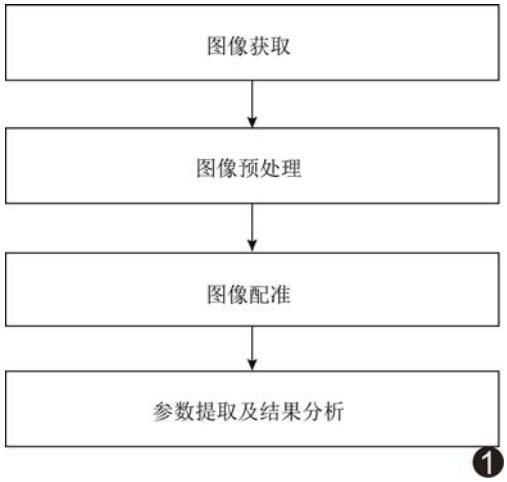


图 1　试验流程图

2　图像获取

于 2015 年 10 月—12 月征集 21 名受试者纳入研究，包括临床诊断为颈椎病患者 14 例(患者组)及健康志愿者 7 名(正常组)。患者组中，男 4 例，女 10 例，年龄 22～54 岁，中位年龄 37.0 岁；正常组中，男 2 例，女 5 例，年龄 23～45 岁，中位年龄 34.0 岁。所有受试者对试验风险均知情同意，自愿参与试验。

采用岛津 Sonial vision Safire Ⅱ平板数字化 X 线多功能透视摄影系统进行颈椎动态检测。设置管电流为 2 mA，管电压为 60 kV，X 球管与受试者颈部皮肤间的距离为 1.2 m，调整成像中心于受试者颈椎 C4 椎体。为观察颈椎的运动状态，X 线摄片时嘱受试者侧位站立，双手叉腰，肘向后靠拢，首先进行低头至过屈位，而后在 15 s 内从过屈位匀速运动至过伸位。将 X 线机置于“准备”态，在受试者颈椎以匀速从过屈位运动至过伸位的过程中进行 X 线曝光，图像采集速率为 6 帧/秒，共采集 15 s[10]。所获图像为 1179×782 像素，将图像按顺序编号命名，取每一受试者 8 帧不同位置图像，见图 2。

3　图像预处理及配准

3.1　选取 ROI　为方便后续的参数提取，对所获取图像进行预处理，在 Matlab 中读取已保存的图像，选取涵盖颈椎过屈位至过伸位的全部位置区域的最小图像作为 ROI，记为 W，大小为 u×v 像素，其中 u 为横向像素个数，v 为纵向像素个数，对每一受试者选取的 ROI 图像大小不同，但需使每个位置的颈椎均在 ROI 内，图 3 所示即为从图 2 的图像中选取的 ROI。

3.2　图像增强　为提高图像对比度，调整图像的灰度直方图分布，使颈椎部分更为突出且减少其周围组织和噪声的影响，根据图像自身的特点，选取基于形态学的顶帽、底帽变换图像增强算法和基于 Retinex 色彩理论[11]的图像增强算法进行双增强。

顶帽、底帽变换的一个重要用途是校正不均匀光照[12]，在多张图像的处理中，该算法对背景光照进行了校正，见图 3。Retinex 色彩理论是基于人类视觉基础的理论，该算法具有锐化图像、颜色恒常性、动态压缩范围大、可对不同图像进行自适应增强等优点[11]，但对噪声较敏感[12]。联合两种方法可使图像增强效果更好(图 4)，以便颈椎边缘的完整提取。

3.3　边缘提取　为提取颈椎各椎体左侧边缘曲线得到颈椎运动轨迹，从而观察整体运动趋势，采用性能优良 Canny 算子[13]初步提取边缘，见图 5。

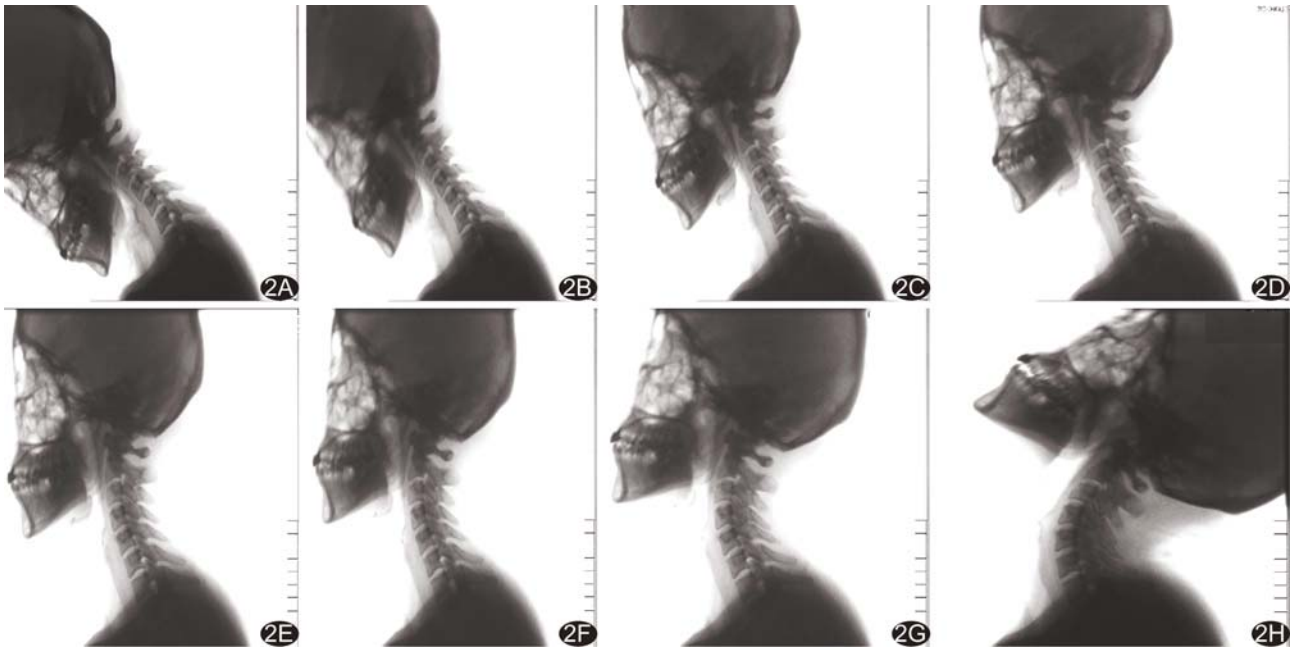


图 2　受试者颈椎过屈位(A～D)运动至过伸位(E～H)X 线图像

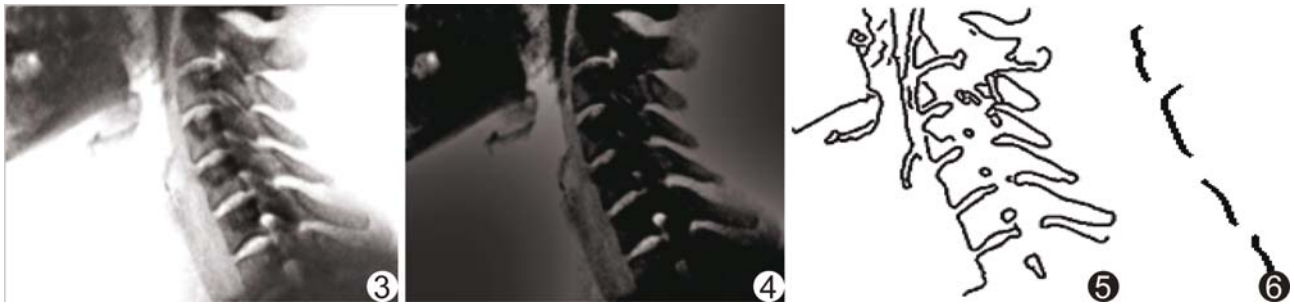


图 3　顶帽、底帽变换图像增强算法后图像　**图 4**　Retinex 色彩理论增强后图像　**图 5**　采用 Canny 算子初步提取颈椎边缘曲线
图 6　修正后提取的椎体左侧边缘曲线

在第 1 帧图像的颈椎椎体边缘选取 m 个种子点，并将各点坐标保存于 m×2 的矩阵 A(x，y)内。在第 2 帧图像内遍历像素点，在 m 个种子点的增长区域内寻找像素值为 1 的点，并将此点的坐标保存在与图像大小相等的矩阵内。种子点(x_{ij}，y_{ij})的增长区域为：

横坐标：(x_{ij} － a_1，x_{ij} ＋ a_2)，i ＝ 1，2，3，…，n；j＝1，2，3，…，m

纵坐标：(y_{ij}－b_1，y_{ij}＋b_2)，i＝1，2，3，…，n；　j＝1，2，3，…，m

其中，a_1，a_2，b_1，b_2 由多次实验得出，范围为 3～7，不同受试者的参数选择不同。n 为图像的帧数，以包括过屈位和过伸位为边界，一般为 80～90 帧。初次完成后，对提取的边缘作出修正，此时可较光滑地提取颈椎椎体边缘的左侧曲线，见图 6。左侧曲线的像素点即为新的种子点，将其保存于矩阵 A 内，作为下一帧图像的遍历的种子点，各帧图像均以前一帧图像颈椎左侧边缘曲线为种子点进行遍历，各帧图像依次进行，并将各帧所得矩阵 A 内的种子点坐标均保存于数组 C 内，数组 C 大小与 W 相同。

3.4　边缘曲线配准　为观察颈椎整体运动的范围和趋势变化，减少在拍摄时受试者肩部位置改变的影响，选取第 1 帧图像颈椎的 C6 椎体左下侧顶点为基点进行配准，在提取完颈椎椎体左侧曲线后，此点即为纵坐标 y 值的最大点，坐标记为 M_1(X_1，Y_1)，第 2 帧图像相同位置的点坐标记为 M_2(X_2，Y_2)，以此类推，最后一帧相同位置点坐标记为 M_n(X_n，Y_n)。

配准距离差为：D_i(X，Y)＝M_i(X_i，Y_i)－M_1(X_1，Y_1)；　i＝2，3，4…，n

配准过程为：B_i(x_{ij}，y_{ij})＝A_i(x_{ij}，y_{ij})－D_i(X，Y)；　i＝2，3，4，…，n；j＝1，2，3，…，m

表 1　患者组与正常组 C4、5 椎体过屈位、过伸位的角度比较(°)

组别	C4 椎体		C5 椎体	
	过屈位角度	过伸位角	过屈位角度	过伸位角
患者组	25.63±7.36	15.56±9.91	21.91±7.96	11.51±9.52
正常组	38.05±11.16	15.11±8.32	34.88±8.17	10.60±8.96
P 值	0.01	0.92	<0.01	0.84



图 7　C4、5 椎体左边缘曲线　A. 正常人；B. 颈椎病患者

此时，颈椎椎体的左侧曲线全部以 C6 椎体的左下侧顶点为基准点配准，观察颈椎整体的运动趋势、颈椎的生理曲线状况及颈椎后伸位的最大位置所在，见图 7。

4　参数提取与结果分析

将各受试者的图像归一化为 86 帧，以 C4、5 椎体为感兴趣节段，分别以其第 1 帧左侧边缘曲线为起点选择种子点，用上述方法处理(图 7)，红色代表配准前所在位置，其他不同颜色代表各帧图像各椎体左侧边缘所在位置。

患者组与正常组 C4、5、6 椎体动态轨迹不同，患者组颈椎生理弯曲消失，且 C4、5 椎体间隙较小，且在颈椎屈伸运动过程中椎体间隙大小发生明显变化。

记录单椎体运动，选取数组 C 内第 5～10 行所有数据，按列求取平均值的相对固定点坐标 $N_i(x_i, y_i)$，$i=2,3,\cdots,n$。为观察单椎体的运动趋势，以配准点的横坐标作基准线，计算椎体左侧边缘曲线与基准线的夹角：

$$\theta = \arctan\frac{(X_1 - x^i)}{(Y_1 - y^i)}$$

$$i = 2,3,4,\cdots,n$$

患者组及正常组的 C4 与 C5 椎体的夹角及其在运动过程中的变化见图 8、9。

以 C4 椎体分析颈椎的运动速率，其角度变化见图 8B；对离散数据进行差分运算，其速率变化见图 10。由于颈椎病患者不能很好地控制颈椎的运动从而产生被动的速率变化，表现为运动的不稳定性。患者组角度变化的波动性大，其速率改变的幅度及改变频率均较大(图 10)。患者组与正常组颈椎运动速率方差对比见图 11，患者组方差为 0.462，正常组为 0.331。

观察单椎体运动轨迹(图 8、9)，分析患者组与正常组 C4、5 椎体左侧边缘曲线与基准线的夹角，对患者组和正常组 C4、5 椎体过屈位、过伸位的角度采用 SPSS 软件进行两独立样本 t 检验结果见表 1。患者组与正常组 C4、5 椎体在过屈位时角度有差异有统计学意义(P 均<0.05)，而在过伸位时差异无统计学意义(P 均>0.05)。

分析相邻单椎体相对位置的改变时，将 C4、5 椎体角度的变化相减，计算 C4、5 椎体相对位置变化的数据并拟合出模板。患者组及正常组 C4、5 椎体相对位置变化数据比较见图 12，红色为正常组模板数据，蓝色为患者组的数据，可见患者组椎体相对位置的改变较小，曲线较正常组平缓且最低点绝对值较小。

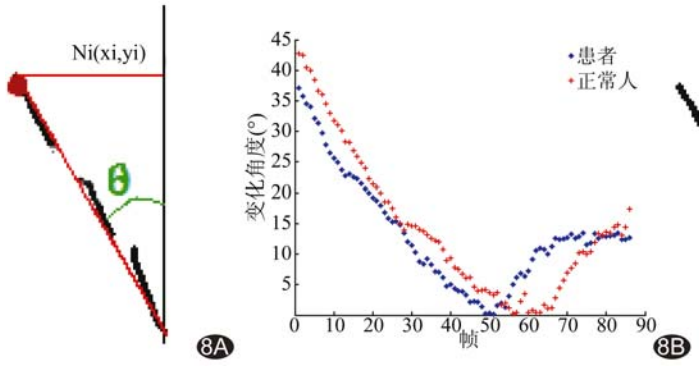


图 8　C4 椎体运动轨迹　A. C4 椎体夹角示意图；B. C4 椎体角度变化对比图

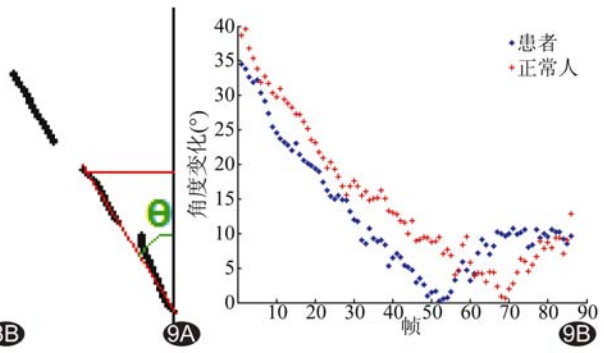


图 9　C5 椎体运动轨迹　A. C5 椎体夹角示意图；B. C5 椎体角度变化对比图

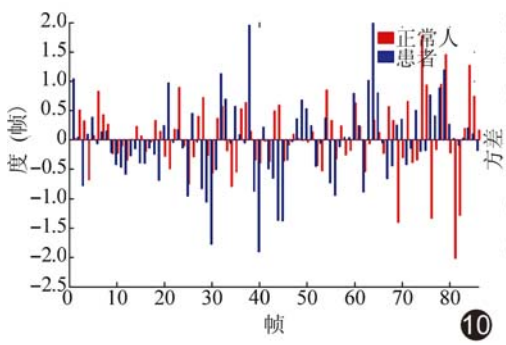


图 10　正常人与患者椎体角度变化速率对比图

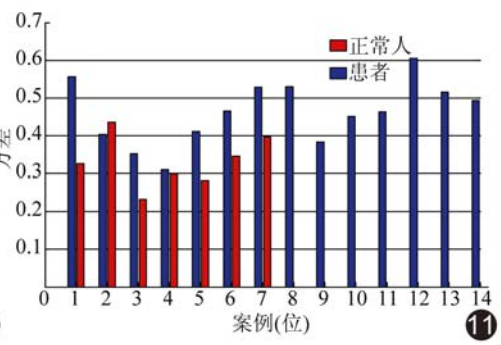


图 11　正常人与患者椎体角度变化速率方差对比图

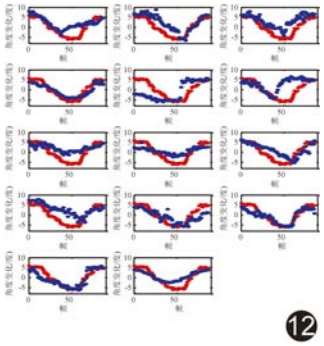


图 12　正常人与患者 C4 与 C5 椎体相对位置变化

5　结语

本研究在对图像进行预处理的基础上对颈椎椎体左侧边缘进行提取分析，以配准点横坐标为基准线，观察 C4、5 椎体在自发性颈椎屈伸运动过程中椎体左侧边缘曲线与基准线夹角的变化趋势，分析颈椎运动速率，发现颈椎病患者颈椎运动过程中速率呈跳跃性变化。此外，本研究以 C4、5 椎体左侧边缘与基准线的夹角的差值反映单椎体在运动过程中相对位置的改变，基于连续图像的动态特征分析，为单椎体运动的研究提供更多数据，也为颈椎病诊断提供更多参考信息。但本研究的样本量较少，且因存在个体差异，不同患者 C4、5 椎体在运动过程中相对位置变化曲线不同，该差异还有待进一步深入研究。

［参考文献］

［1］ Nagamoto Y, Ishii T, Sakaura H, et al. In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(10): 778-783.

［2］ Nagamoto Y, Iwasaki M, Sugiura T, et al. In vivo 3D kinematic changes in the cervical spine after laminoplasty for cervical spondylotic myelopathy. J Neurosurg Spine, 2014, 21(3): 417-424.

［3］ Xu X, Hao HW, Yin XC, et al. Automatic segmentation of cervical vertebrae in X-ray images. International Joint Conference on Neural Networks, 2012, 20: 1-8.

［4］ 郑伟龙，王志勇，王世斌，等. 颈椎三维运动测量及生物力学特性研究//北方七省市区力学学术会议，2014：70-71.

［5］ Lee JH, Kim JS, Lee JH, et al. Comparison of cervical kinematics between patients with cervical artificial disc replacement and anterior cervical discectomy and fusion for cervical disc herniation. Spine J, 2014, 14(7): 1199-1204.

［6］ Bell KM, Bechara BP, Hartman RA, et al. Influence of number of operated levels and postoperative time on active range of motion following anterior cervical decompression and fusion procedures. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(4): 263-268.

［7］ Bechara BP, Bell KM, Hartman RA, et al. In vivo analysis of cervical range of motion after 4- and 5-level subaxial cervical spine fusion. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(1): E23-E29.

［8］ Anderst WJ, Vaidya R, Tashman S. A technique to measure three-dimensional in vivo rotation of fused and adjacent lumbar vertebrae. Spine J, 2008, 8(6): 991-997.

［9］ 叶斌. 动态 X 线片在颈椎病早期诊断中的作用. 现代诊断与治疗，2013，24(5)：1130-1131.

［10］ Bifulco P, Cesarelli M, Romano M, et al. Measurement of intervertebral cervical motion by means of dynamic X-ray image processing and data interpolation. Int J Biomed Imaging, 2013, 2013: 152920.

［11］ 陈琛，张建州. 改进的多尺度 Retinex 医学 X 射线图像增强算法. 计算机工程与应用，2015，51(9)：191-195.

［12］ 马超玉. 光照不均匀条件下图像增强算法研究. 长春：长春理工大学，2014：4-13.

［13］ Wang XJ, Liu XM, Yong G. Image edge detection algorithm based on improved canny operator. Computer Engineering, 2012, 38(14): 168-172.