

## 激光主动成像图像边缘检测算法

强钰捷, 张合新, 孟飞, 惠俊军  
(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 针对激光主动成像图像特点,提出一种改进的 Canny 边缘检测算法。该算法在 Canny 边缘检测算法的基础上,采用投票中值滤波和提升小波级联的方法代替传统的高斯滤波器;采用  $3 \times 3$  邻域的权值自适应梯度计算方法代替原有的  $2 \times 2$  邻域差分运算。仿真实验证明:该算法提升了传统 Canny 算子的抗干扰能力和鲁棒性,能够较好地保存边缘信息,准确检测出图像边缘,并且实时性较好,更具实用性。

**关键词:** 激光主动成像; 边缘检测; Canny 算子; 投票中值滤波; 提升小波

**中图分类号:** V271.4; TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0027-05

## An Edge Detection Algorithm for Images of Laser Active Imaging

QIANG Zheng-jie, ZHANG He-xin, MENG Fei, HUI Jun-jun  
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** According to the image characteristics of laser active imaging, an improved Canny edge detection algorithm was proposed. Based on Canny edge detection, the algorithm used the voting median filtering and lifting wavelet transform to replace the traditional Gaussian filter, and calculated the grades of filtered images by using an adaptive method of  $3 \times 3$  adjacent regions gradient. Simulation results show that: the algorithm can improve the anti-interference capability and robustness of traditional Canny operator, keep well the detail edge information and has fine real-time performance, which makes it more practical.

**Key words:** laser active imaging; edge detection; Canny operator; voting median filter; lifting wavelet transform

### 0 引言

激光主动成像能够同时获取目标的多种特征信息,准确描述目标信息,因而突破传统成像概念,迅速成为研究的热点。运用激光主动成像技术的制导武器以其制导精确、抗干扰能力强、适应战场复杂环境的优点,已得到各国军方广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。边缘特征是制导目标识别中的一个非常重要的特征信息,因此对于图像边缘的检测显得尤为重要。但在实际应用过程中,复杂环境背景、噪声干扰及成像系统设计等因素的影响,会造成激光主动成像图像对比度差、信噪比低、轮廓模糊,导致目标识别的准确性下降<sup>[3]</sup>。因此,激光主动成像图像的边缘检测算法研究是该技术在实际应用中需要解决的重要问题。

近年来,Canny 算子以其定位准确,单边响应和信噪比高等优点在图像边缘检测方面发展迅速。但经过实际应用发现传统的 Canny 算子仍存在一些问題,如 Canny 算子中采用的高斯平滑滤波尺度难以把握,易造成细节丢失或产生虚假边缘;Canny 算子对噪声的抗干扰性不强,在信噪比较差的情况下边缘提取效果不佳<sup>[4]</sup>。所以针对这些问題,本文利用提升小波变换在尺度变换和计算简便方面的优势,并结合投票中值滤波去噪性能好的特点,提出了一种基于中值滤波和提升小波的改进 Canny 边缘检测算法,取得良好的边缘检测效果。

### 1 投票中值滤波

投票法的统计学原理是:对于  $N \times N$  ( $N$  为大于等于 3 的奇数) 个像素的邻域窗口,假设灰度值等于灰度中值的像素个数是  $M$ ,灰度值比灰度中值小的像素个数是  $M_{\min}$ ,灰度值比灰度中值大的像素个数是  $M_{\max}$ 。灰度中值的统计特征为<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} M_{\max} + M \geq 0.5(N \times N + 1) \\ M_{\min} + M \geq 0.5(N \times N + 1) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2014-05-15 修回日期:2014-06-19

基金项目: 预研基金(9140A010604)

作者简介: 强钰捷(1989—),男,陕西西安人,硕士生,研究方向为控制科学与工程。

按灰度值从小到大(或从大到小)的顺序统计像素个数,当满足式(1)时,此刻最后一次被纳入统计范围的灰度值即为中值<sup>[6]</sup>。具体步骤如下所述:1) 确定邻域滑动窗口的大小;2) 投票箱初始化;3) 对邻域窗口内的所有元素进行扫描,投票箱数组中对应下标等于灰度值的元素自加一;4) 按照投票箱数组元素下标由低至高(或由高至低)进行求和,第一个满足条件的灰度值即为中值;5) 窗口中心像素点向右移动,原窗口内各列均向左移动,最左列移出窗口,最右列移入窗口,根据窗口变化,修改投票箱,返回步骤4)重新进行判断,若为最后一个像素值则停止。

显然,投票法不需要进行排序运算,对窗口内的像素最多扫描一遍即可,逻辑简单,大大简化了运算的复杂度和时间。

## 2 提升小波变换

由 Sweldens 提出的提升小波变换由以下 3 个步骤组成。

1) 分裂(split)。采用惰性分割方法,将信号  $x_j$  进行奇、偶采样,分割成偶样本序列  $E_{j-1}$  和奇样本序列  $O_{j-1}$ ,分裂过程可以表达为

$$\text{Split}(x_j) = (E_{j-1} + O_{j-1})。 \quad (2)$$

2) 预测(predict)。利用两个集合的相关性,用偶样本序列  $E_{j-1}$  对奇样本序列  $O_{j-1}$  进行预测,其误差为

$$d_{j-1} = O_{j-1} - P(E_{j-1}) \quad (3)$$

式中: $P$  为预测算子; $d_{j-1}$  为小波系数,在图像中对应着图像的细节部分(高频部分)。

3) 更新(update)。定义更新算子  $U$ ,使  $d_{j-1}$ ,即细节部分(高频部分),通过更新,再与偶样本序列  $E_{j-1}$  相加得到  $x_{j-1}$ ,即全局信息(低频部分)。更新的过程可以表达为

$$x_{j-1} = E_{j-1} + U(d_{j-1})。 \quad (4)$$

提升小波重构,提升小波分解的逆变换也称为提升小波的重构,共包含 3 个部分:反预测、反更新和合并(merge)。反预测为

$$E_{j-1} = x_{j-1} - U(d_{j-1}) \quad (5)$$

反更新为

$$O_{j-1} = d_{j-1} + P(E_{j-1}) \quad (6)$$

合并为

$$x_j = M(O_{j-1}, E_{j-1}) \quad (7)$$

式中, $M$  为合并运算。

## 3 算法设计

由统计特性可知,激光主动成像图像主要受到散斑噪声、脉冲噪声及高斯噪声的污染,根据激光主动成像

技术的实际应用,需要在对图像进行较好的边缘检测的同时,兼具较高的计算效率,因此,传统的 Canny 边缘检测算法不能满足。本文提出了一种基于投票中值滤波和提升小波级联的改进 Canny 边缘检测算法。该算法能够很好地适用于激光主动成像图像边缘检测,具有较好的检测效果,对实际应用具有很好的参考价值。

### 3.1 Canny 边缘检测算法及不足

传统的 Canny 算子首先用一个二维的高斯滤波器平滑图像;然后利用差分模板近似计算梯度值和方向;再通过“非极大值抑制”确定局部的极大值点,采用双阈值门限法去除虚假点,确定边缘点;最后进行插值,将边缘点连接起来,形成连贯的曲线。分析传统 Canny 算子在激光主动成像图像的边缘检测中的应用,发现存在以下三点不足。

1) 激光主动成像图像所含噪声主要有散斑噪声、高斯噪声以及脉冲噪声等,而 Canny 算子中采用的高斯平滑滤波器对散斑噪声的抑制效果并不理想。

2) 高斯平滑滤波尺度难以把握。高斯滤波器参数  $\sigma$  控制平滑程度,当  $\sigma$  较小时定位精度高,但平滑作用较弱,对图像噪声的抑制不够;当  $\sigma$  较大时,图像去噪效果好,但造成边缘过渡平滑及缓变边缘丢失,使得边缘定位不准。由此可见,传统 Canny 边缘检测算法对噪声的鲁棒性不强<sup>[7]</sup>。

3)  $2 \times 2$  邻域内取差分计算梯度,对噪声过于敏感,容易丢失细节信息,出现假边缘。

### 3.2 算法设计及流程

1) 在空域内,对激光主动成像图像进行  $3 \times 3$  的投票中值滤波,较大程度地消除脉冲噪声的影响。

2) 采用对称紧支撑且具有较高的正则性和消失矩的 D9/7 小波对图像进行二层提升小波分解,得到分解后图像 DD,DC,CD,CC,分别是行高频列高频、行高频列低频、行低频列高频、行低频列低频。分解过程如图 1 所示。

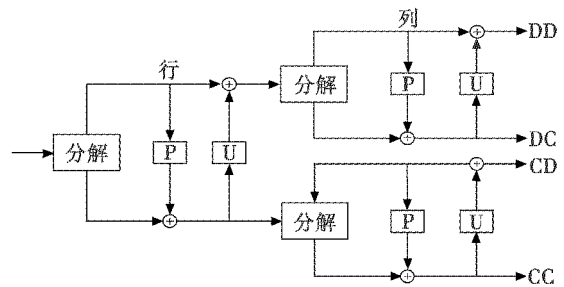


图 1 小波分解过程示意图

Fig. 1 Schematic of wavelet decomposition process

图中,高频部分反映了图像的细节,低频部分反映了图像的轮廓。而散斑噪声主要集中在低频部分,所以对分解得到的低频小波系数进行软阈值处理。文献

[8]的局部自适应阈值法,其主要思想是将自适应阈值和平移不变去噪的思想结合起来,使得小波系数的阈值由基于该位置的图像方差进行自适应选择。即将

Bayes 阈值  $T_{\text{Bayes}}^j = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x(j)}$  改进为

$$T_{\text{Bayes}}^j(m, n) = \frac{\hat{\sigma}_n^2}{\hat{\sigma}_x(j, m, n)} \quad (8)$$

式中:  $j$  为小波分解尺度;  $(m, n)$  为空间位置;  $\hat{\sigma}_n^2$  为噪声信号方差  $\sigma_n^2$  的估计;  $\hat{\sigma}_x(j, m, n)$  为图像信号标准差  $\sigma_x(j)$  的估计。由处理后得到的小波系数进行图像重构,得到降噪图像。

3) 采用自适应方法计算梯度幅值和方向,对去噪后的图像采用一种改进的  $3 \times 3$  邻域自适应梯度计算方法。该方法可计算  $x, y, 45^\circ, 135^\circ$  方向上的一阶偏导,通过这 4 个方向的一阶偏导所占梯度权值来确定中心点的幅值。 $3 \times 3$  邻域窗口如图 2 所示。

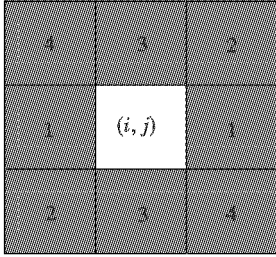


图 2  $3 \times 3$  邻域窗口示意图

Fig. 2 Schematic of  $3 \times 3$  neighboring window

点  $(i, j)$  为中心像素点,  $R_1, R_2, R_3, R_4$  分别为  $x, 45^\circ, y, 135^\circ$  方向上的梯度权值,其取值等于该方向上的一阶偏导在梯度方向上投影与自身大小的比重,即

$$\begin{cases} R_1 = \cos[0 - \theta(i, j)] \\ R_2 = \cos[\pi/4 - \theta(i, j)] \\ R_3 = \cos[\pi/2 - \theta(i, j)] \\ R_4 = \cos[3\pi/4 - \theta(i, j)] \end{cases} \quad (9)$$

则点  $(i, j)$  的梯度幅值和方向分别为

$$M(i, j) = [(R_1 \times P_1)^2 + (R_2 \times P_2)^2 + (R_3 \times P_3)^2 + (R_4 \times P_4)^2]^{1/2} \quad (10)$$

$$\theta(i, j) = \arctan(P_y/P_x) \quad (11)$$

4) 非极大值抑制。在以点  $(i, j)$  为中心的  $3 \times 3$  邻域内,若中心点  $(i, j)$  的幅值不大于其梯度方向上相邻两像素点的幅值,那么认为该像素点为非边缘点;反之,确定该点为候选边缘点。

5) 双阈值检测和边缘连接。对非极大值抑制得到的候选边缘点采用双阈值法检测。设定两个阈值  $\tau_1$  和  $\tau_2$ , 且  $\tau_1 < \tau_2$ , 从而得到两个阈值边缘图像  $T_1[i, j]$  和  $T_2[i, j]$ 。然后连接高阈值检测结果  $T_2[i, j]$  中的边缘轮廓,当达到轮廓的端点时,再从低阈值检测结果

$T_1[i, j]$  的 8 相邻位置中寻找边缘点,这样不断在  $T_1[i, j]$  中收集边缘,直到将  $T_2[i, j]$  连接起来为止。

### 3.3 算法有效性分析

首先,中值滤波对消除图像中脉冲干扰和颗粒噪声是非常有效的,提升小波变换对于散斑噪声有较好的抑制效果,同时二者均对高斯噪声有不错的抑制效果。所以,该算法能够有效抑制激光主动成像图像中含有的各类噪声。

其次,采用 Bayes 自适应阈值滤波能够根据不同位置的图像方差进行阈值的自适应选择,可达到去噪和保护边缘细节的目的。采用  $3 \times 3$  邻域自适应梯度计算方法也能提高算法对噪声的抗干扰性。

本文算法采取的投票法中值滤波和提升小波变换在运算效率和运行时间上效果理想,可满足实际工程应用的实时性需要。

综上所述,该算法可以有效滤除激光主动成像图像中的主要噪声,保护边缘细节,抑制虚假边缘,且具有较好的实时性。

## 4 仿真实验

本文算法是基于激光主动成像在平台探测和飞行器的匹配制导实际应用背景下提出的,所以传统的 Canny 检测算法的三条评价标准仅能对图像的边缘检测质量进行评价,对图像边缘检测结果的可匹配性无法判断。因此,本文采用相关长度和独立像元两种评价指标,具体如下所述。

1) 相关长度<sup>[9]</sup> (Correlation Length) 定义为自相关系数  $\rho$  与二维坐标轴所围成的面积  $L$ , 并且其具有方向性,对于二维图像,分别分为水平方向与垂直方向的相关长度  $L_h$  与  $L_v$ , 可以用以下定义求得

$$\begin{cases} L_h \cdot 1 = \int_0^\infty e^{-c_1(h)} dh = \frac{1}{c_1} \\ L_v \cdot 1 = \int_0^\infty e^{-c_2(v)} dv = \frac{1}{c_2} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $c_1, c_2$  为常数;  $h, v$  分别为水平方向和垂直方向上的增量。一般认为,凡是行距超过  $L_h$  或者列距超过  $L_v$  的两个像元是不相关的。

2) 独立像元数是图像独立信息的一种度量,定义为

$$D = \frac{M}{L_h} \cdot \frac{N}{L_v} \quad (13)$$

独立像元数从统计角度反映了实时图内包含的独立景物的多少,独立像元数越大,匹配效率会越高。

图 3a 为某地区的下视图像,具有较好的分辨率和信噪比;图 4a 为距离某建筑物 2 km 的前视激光雷达强度图像,信噪比较差。采用 Matlab 7.0 对这两幅图像

运用不同的算法进行边缘检测,仿真结果如图3~图4所示。

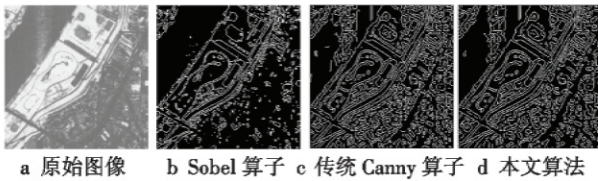


图3 图像边缘检测效果比较图 I

Fig. 3 Comparison of edge detection for image I

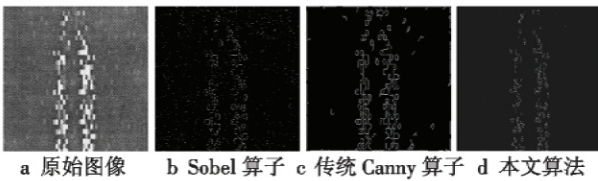


图4 图像边缘检测效果比较图 II

Fig. 4 Comparison of edge detection for image II

由检测的仿真结果图3b可以看出,在图像信噪比较高的情况下,Sobel算子能够检测到大部分边缘,但明显会造成边缘扩展,并且漏检和错检比较严重;图4b中,在信噪比较差的情况,几乎检测不到边缘,说明Sobel算子对噪声的抗干扰性较差。传统Canny算子首先进行高斯平滑滤波,然后再进行边缘检测,所以对噪声有一定的抑制作用,具有较好的边缘检测效果。但对于弱边缘的细节信号检测效果不理想,细节信号易被滤波掉,或者被模糊化。而本文算法,首先采用投票中值滤波对图像中的脉冲噪声进行滤除,在信噪比较差的情况下仍有较好效果;再根据小波分解多尺度思想进行滤波检测,采用Bayes自适应阈值可对边缘进行有选择的增强,所以既能够滤除噪声,又能很好地保持弱边缘,达到不漏检不错检的准则。从视觉效果来看,本文的算法达到了较为理想的检测效果。

边缘检测的目的是通过计算机进行匹配制导,所以除了Canny准则,边缘检测结果图像的可匹配性判断是一个非常重要的指标参数。表1所示为对以上算法仿真的结果进行相关长度( $L_h$ ,  $L_v$ )、独立像元数 $D$ 以及运行时间 $T$ 的统计。

表1 边缘检测算法仿真数据统计

Table 1 Simulation data statistics of edge detection algorithm

图像	原始图像	Sobel算子	传统 Canny算子	本文算法
图3	$L_h$	26.45	18.67	15.14
	$L_v$	39.83	17.18	15.66
	$D$	62	204	276
	$T/s$		0.148 3	0.269 8
图4	$L_h$	58.22	120.3	25.29
	$L_v$	64.37	116.8	26.42
	$D$	17	5	98
	$T/s$		0.017 4	0.047 7

分析表中数据,从匹配性来看,图3a原图的匹配性并不高,经过几种方法进行边缘检测后,图像的可匹配性均有大幅提高,其中,本文算法在提取激光雷达图像边缘的检测结果中具有最高的匹配性;对于信噪比较差的图4b,Sobel算子几乎无法检测到边缘,所以其可匹配性比原图还差,传统Canny算子具有一阶平滑滤波作用,有一定的抗干扰性,所以检测到的边缘图像具有一定的匹配性,但相比原图并没有太大的提高,本文算法能够较好地抑制噪声,在信噪比较低的情况下,增强边缘效果的作用,有较强的适应性和鲁棒性,所以该方法检测到的边缘图像具有最好的可匹配性。

分析运行时间,Sobel算子只利用了模板卷积,所以计算时间最短<sup>[10]</sup>,但匹配性并不理想。传统Canny算子先进行高斯平滑滤波,再进行处理,在匹配性上较Sobel算子有所提高。本文算法是在Canny算子的基础上,采用计算简单的投票中值滤波和提升小波变换级联滤波代替高斯滤波,在拥有最高匹配性的同时仅少量增加了运算时间,具有较好的实时性。

## 5 结论

本文在分析传统Canny边缘检测算法的基础上,结合边缘检测在激光主动成像制导方面的实际应用,提出了一种基于投票中值滤波和提升小波变换的改进Canny算子。通过使用实际的激光图像进行仿真验证,本文算法对于激光主动成像图像的边缘检测是适用的,并且通过视觉效果和各项性能指标表明,该算法具有较强的抗干扰能力,较好的边缘细节保护能力,能够较为完整、准确地检测图像边缘,并且较快的运算速度使其更具工程应用价值。

## 参考文献

- [1] VAIDYANATHAN M, BLASK S, HIGGINS T, et al. Jigsaw phase III: A miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration[C]//SPIE, 2007, 6550:1-12.
- [2] BLANQUER E. Ladar proximity fuze-system study[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology(KTH), 2007.
- [3] 吴坤,孟飞,慕连好,等.激光主动成像图像边缘检测[J].电光与控制,2013,20(9):88-92. (WU K, MENG F, MU L H, et al. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(9): 88-92.)
- [4] 薛丽霞,李涛,王佐成.一种自适应的Canny边缘检测算法[J].计算机应用研究,2010,27(9):3588-3590. (XUE L X, LI T, WANG Z C. Adaptive Canny edge detection algorithm[J]. Application Research of Computers,



- 2010, 27(9):3588-3590.)
- [5] ZHEN C G, HAN P, LIN B H. Improved BP network-based realtime monitor for NO<sub>x</sub> releasing from power planturnace[C]//IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2003. doi: 10. 1109/ICMLC. 2003. 1259638.
- [6] 张欣, 刘英, 高秀艳. 自适应投票快速中值滤波算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 148-150. (ZHANG X, LIU Y, GAO X Y. Research on auto-adapted voting fast median filtering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(6): 148-150.)
- [7] 李安安, 何坤, 詹晓倩, 等. 多尺度下的噪声图像边缘检测[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 228-231. (LI A A, HE K, ZHAN X Q, et al. Multiscale edge detection for noise image[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(1): 228-231.)
- [8] YEN J C, CHANG F J, CHANG S A. A new criterion for automatic multi-level thresholding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(3): 370-378.
- [9] 孟飞, 夏朝辉, 强钰捷, 等. 激光主动成像图像边缘检测算法研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1192-1196. (MENG F, XIA Z H, QIANG Z J, et al. Edge detection algorithm of intensity image for laser active imaging [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1192-1196.)
- [10] 李琦, 傅俊诚, 李自勤, 等. 激光雷达含噪图像边缘检测算法比较[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 239-243. (LI Q, FU J C, LI Z Q, et al. Comparison of the edge detection algorithms for lidar image with speckle noise[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(3): 239-243.)
- (上接第26页)
- [3] 曾翎, 刘斐, 乔辉. 基于互信息的功能磁共振图像配准[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 138-140. (ZENG L, LIU F, QIAO H. Functional magnetic resonance image registration based on the mutual information [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 138-140.)
- [4] 李琦, 姬红兵, 同鸣. 一种多模态医学影像鲁棒配准方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 30-33. (LI Q, JI H B, TONG M. Robust registration of multimodality medical images based on the principal ordinal feature and hybrid entropy[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 30-33.)
- [5] 王丽, 孙丰荣, 王奕琨, 等. 基于互信息的颅脑MR影像序列的三维配准[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(31): 160-163. (WANG L, SUN F R, WANG Y K, et al. 3D registration of MR image sequence of human brain based on normalized mutual information [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(31): 160-163.)
- [6] 刘峰, 龚健雅. 一种基于多特征的高光谱遥感图像分类方法[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 19-22. (LIU F, GONG J Y. A classification method for high spatial resolution remotely sensed image based on multi-feature [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(3): 19-22.)
- [7] 周海芳, 杜云飞, 杨学军, 等. 基于互信息的遥感图像区域配准并行算法的研究与实现[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 174-180. (ZHOU H F, DU Y F, YANG X J, et al. Study and implement of parallel region-based registration algorithm based on mutual information for remote-sensing images [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(1): 174-180.)
- [8] BRADSKI G, KAEHLER A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 452-473.
- [9] MAES F, COLLIGNON A, DIRK V, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 189-198.
- [10] 刘喜平, 龚晓彦, 郭希娟. 基于互信息的医学图像匹配中的改进插值算法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 194-197. (LIU X P, GONG X Y, GUO X J. Expanded interpolation in medical image registration based on mutual information [J]. Computer Simulation, 2010, 27(7): 194-197.)
- [11] 张峻豪, 孙焱, 詹维伟. 基于加权互信息的多模图像配准算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(16): 207-211. (ZHANG J H, SUN Y, ZHAN W W. Multi-modality image registration algorithm based on weighted mutual information [J]. Computer Engineering, 2012, 38(16): 207-211.)
- [12] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 1988: 147-151.