

# 五台山壁画人物线描图生成算法

焦莉娟<sup>1</sup> 王文剑<sup>2\*</sup> 李朝霞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(忻州师范学院计算机系 山西 忻州 034000)

<sup>2</sup>(山西大学计算机与信息技术学院 山西 太原 030006)

**摘要** 五台山壁画图像因褪色而导致颜色不均匀、部分边缘轮廓像素灰度缺失,用传统的梯度法生成的线描图存在噪点多且线条不连续的问题。提出一种基于色调补偿及双卷积技术的壁画人物线描图生成算法。在计算梯度幅值时引入色调梯度进行有效的色调补偿,同时通过两种针对离散噪点的卷积模板实现去麻点功能。对五台山壁画人物图像的线描图生成实验的结果表明,该方法在去噪的基础上有效改善了轮廓线不连续的问题。

**关键词** 五台山壁画 壁画线描图 轮廓提取 微分算子

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.10.036

## LINE DRAWING OF WUTAI MOUNTAIN MURAL FIGURES GENERATING ALGORITHM

Jiao Lijuan<sup>1</sup> Wang Wenjian<sup>2\*</sup> Li Zhaoxia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Computer Department, Xinzhou Teachers University, Xinzhou 034000, Shanxi, China)

<sup>2</sup>(School of Computer and Information Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

**Abstract** The image of Wutai Mountain murals is faded, resulting in uneven hue and grayscale missing of some edges. The line drawing generated by traditional gradient method has many noise points and discontinuous lines. A line drawing of mural figures generating algorithm based on tone compensation and double convolution technology is proposed. The hue gradient was introduced to calculate the gradient amplitude for effective hue compensation. Two kinds of convolution templates for discrete noise were used to achieve the function of denoising. Experimental results on Wutai Mountain murals figures line drawing illustrate that the proposed algorithm can improve the discontinuity of the contour line on the basis of removing noise effectively.

**Keywords** Wutai Mountain mural Mural line drawing Contour extraction Differential operator

## 0 引言

人物造像是五台山壁画内容的重要组成部分之一。壁画人物的面部表情、姿势形态、手印手势以及服饰特征等元素在美学、宗教、历史以及文物产业化等领域都具有较高的研究和应用价值。生成一幅清晰、真实的线描图对这一研究至关重要。直接参照壁画原图进行手工绘制不仅工作量大、易受环境制约<sup>[1]</sup>,而且由于人眼亮度阈值特性造成的感知精度缺失<sup>[2]</sup>直接影响绘制线描图的真实性。

线描图自动生成主要以边缘检测技术为基础。现

有的边缘检测方法主要有梯度法、Canny 算法以及基于机器学习等方法。基于梯度的边缘检测主要通过微分算子提取图像的灰度梯度特征,从而识别出边缘轮廓像素。常用的微分算子有 Sobel<sup>[3]</sup>、Prewitt<sup>[4]</sup>、Roberts<sup>[5]</sup>等一阶微分算子。二阶的 Laplacian 算子<sup>[6]</sup>能更好地体现图像边缘处的阶跃特性,但对噪声也更加敏感。在此基础上提出的 LoG<sup>[7]</sup>二阶微分算子,利用了高斯函数的平滑效果,具有一定的降噪功能,但降噪的同时也丢失了一些边缘信息。梯度边缘检测方法原理简单、效率高,对场景及内容变化简单的图像提取效果好,但整体抗噪能力差,存在去噪和保留图像细节两方面的取舍矛盾,往往使生成的轮廓图像存在噪声点多、

轮廓线不连续等问题。另外梯度法对光影变化丰富的复杂场景图像的提取效果不佳。Canny 算法<sup>[8-10]</sup>在梯度计算前引入了高斯平滑滤波的同时,通过极大值抑制策略使提取到的边缘线更细、更清晰。该方法通过双阈值处理和滞后阈值跟踪技术对轮廓像素进行取舍,提高了检测精度,但由此导致了 Canny 算法最突出的一个缺陷:检测结果对人工阈值的选择依赖性非常强。另外,当图像笔道较宽时,Canny 提取的结果极易出现双轮廓现象。随着机器学习在计算机视觉领域的广泛应用,基于深度学习的边缘检测网络模型<sup>[11-13]</sup>也相继出现。该方法可通过机器学习提取出图像的高层语义特征,因而对复杂场景图像的边缘检测具有令人意想不到的效果。但将该方法应用于五台山壁画的边缘检测效果不尽如人意,分析原因主要是因为机器学习方法需要大量的训练素材来完成正确的语义信息提取,而五台山壁画来源有限,且壁画内容较为抽象,难以以为机器学习提供良好的训练素材。

目前已有研究者对中国古壁画线描图的数字化生成展开了研究。李永明<sup>[14]</sup>通过对壁画的艺术风格进行研究,提出了一种基于笔画、笔触及艺术风格模型的壁画线描图临摹系统。孙迪<sup>[15]</sup>在改进 FDOG 滤波算法的基础上,构建出一个具有良好用户体验的敦煌壁画线描图生成系统。张琦<sup>[16]</sup>提出一种基于 k-means 聚类与 GrabCut 结合的壁画图像分割方法。上述研究都是建立在人机交互基础上的。许迪<sup>[17]</sup>提出一种基于 Canny 的古壁画线描画生成方法,该方法基于高频提升滤波技术,有效避免了 Canny 算法在笔道较宽时产生两次响应的问题,但仅适用于噪声小且局部范围内笔道灰度值小于背景灰度值的壁画图像。

## 1 相关工作

经过分析研究,五台山壁画图像具有以下特点:

(1) 图像光影变化简单。(2) 人物的轮廓线比较突出,基本由灰度和色调变化组成。(3) 存在脱落、裂缝、褪色等病害问题。(4) 壁画素材资源有限。基于以上分析,本文采取纹理合成修复结合梯度法实现五台山壁画中的人物线描图自动化生成。通过大量实验发现,用梯度法实现五台山壁画线描图易于实现、效率高,提取的轮廓基本清晰、真实,但存在麻点和断线的问题。

本文结合五台山壁画特点对现有的梯度法进行了改进。首先引入纹理合成的方法对脱落及裂缝部分进行修复预处理;然后在计算梯度时自适应地引入色调

梯度值,与亮度梯度值结合生成复合梯度算子,避免因病害型灰度丢失导致边缘处梯度缺失的问题;最后针对壁画初级线描图中麻点多的问题提出双卷积技术,通过对麻点像素分布特点的分析,针对性地设计了两个卷积模板,对初级线描图进行了两次卷积运算,去除错误的轮廓像素。

传统的梯度边缘检测算法利用一阶或二阶微分算子计算图像的灰度变化快慢,通过梯度幅值大小来界定边缘像素。常用的二阶 Laplacian 微分算子可通过式(1)求得。

$$\nabla^2 \Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (1)$$

LoG 算子是在式(1)的基础上引入高斯函数求得:

$$\partial^2 G(x, y) = \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial y^2} \quad (2)$$

其中:

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

即:

$$\nabla^2 G(x, y) = \left( \frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

## 2 本文算法

本文结合五台山壁画特点,通过引入复合梯度算子和双卷积模板,对原梯度算法进行改进。

### 2.1 复合梯度算子

梯度算法抗噪能力差,提取的轮廓图像存在许多噪声点。引入高斯模糊可改善这一问题,但又导致了部分轮廓线的缺失。另外,因年代久远,五台山壁画中存在许多褪色现象,出现在边缘处的褪色也是导致轮廓线不连续的另一原因(如图 1 中黑色圈部分所示)。综合以上两点,边缘处像素灰度变化缺失造成了轮廓线的不连续。通过观察发现,分布在这些边缘线两端的像素虽因模糊导致灰度变化平缓,但颜色对比鲜明,原梯度算法仅通过灰度的梯度值来界定边缘像素,若将色调特征引入梯度运算,可补偿由模糊造成的梯度缺失。



图 1 褪色壁画图像效果

因此本文提出色调补偿技术,将原梯度算子  $g_r$  与色调算子  $g_h$  结合,生成复合梯度算子  $g_c$ :

$$g_c = (1 - \beta)g_r + \beta g_h \quad (5)$$

考虑到模糊现象的不均匀性,式(5)中的调节因子  $\beta$  应自适应地生成:

$$\beta = \frac{\sigma_h}{\sigma_h + \sigma_r} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_h$  为局部色调方差,  $\sigma_r$  为局部灰度方差。

## 2.2 双卷积运算

色调补偿可使灰度变化平缓但色调变化剧烈的边缘线得到检测,但也导致部分平滑区域非边缘像素被错误地检测,使检测结果麻点现象更加严重。分析发现,这些麻点噪声与真实轮廓线相比具有分布离散、聚合度小的特点,其中大部分为单像素或双像素相邻的情形。本文针对这一特点,设计出两种卷积模板,如图2所示。模板一用于检测单像素噪声点,模板二用于检测双像素噪声点。

1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	-24	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

(a) 模板一

1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	-14	-14	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

(b) 模板二

图2 卷积模板

## 2.3 算法步骤

本文提出的五台山壁画线描图生成算法流程如图3所示。首先对输入的壁画图像采用文献[18]提出的基于块匹配的 Criminisi 方法进行修复,去除脱落、裂缝等影响轮廓提取效果的病害部分。然后将修复图转换到 HSI 模型,提取出色调分量,计算色调梯度算子,再结合亮度梯度算子由式(5)和式(6)生成复合梯度算子。在复合梯度算子作用下对第一步得到的修复壁画图像进行轮廓提取,得到初级线描图。最后用图2(a)所示的卷积模板进行初次卷积运算,生成了去掉孤立噪声点的初级去噪线描图,再用图2(b)所示的卷积模板进行二次卷积运算得到最终的壁画线描图。

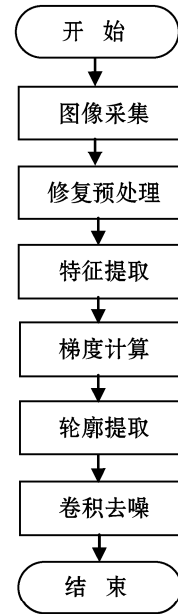


图3 壁画图像线描图生成算法流程图  
算法具体步骤描述如下:

### 算法1 壁画图像线描图生成算法

输入:原始壁画数字图像  $f$  (RGB 模式)。

输出:壁画图像线描图  $g$  (BW 模式)。

1. 用 Criminisi 方法对  $f$  的脱落、退化部分进行修复。
2. 将初级修复图像转换为归一化的灰度模式图像  $g$ 。
3. 生成  $g$  的灰度梯度矩阵  $g_1$ 。
4. 生成  $g$  的亮度梯度矩阵  $g_2$ 。
5. 计算灰度邻域局部方差  $\delta_r$  和色调邻域局部方差  $\delta_h$ 。
6. 用式6计算色调因子  $\beta$ 。
7. 用式5计算生成复合梯度图像  $g_c$ 。
8. 初始化迭代变量  $i=1, j=1$ 。
9. 若  $g_c(i, j) < t$ , 则  $g(i, j) = 1$ :背景;  
若  $g_c(i, j) \geq t$ , 则  $g(i, j) = 0$ :轮廓。
10.  $i, j$  累加后移,若达到边界值则转至11,否则转至9。
11. 分别用图2(a)、图2(b)所示模板对  $g$  进行卷积运算生成  $g_{dn}$ 。
12. 取卷积图像的最大值作为阈值:  $T = \max(g_{dn}(\cdot))$ 。
13. 遍历  $g$  矩阵计算:  $g = (g \geq T)$ , 得到最终去噪后的线描图。

## 3 实验结果及分析

本文实验环境为 Intel Core i5 双核处理器,16 GB RAM,64 位 Windows 10 操作系统, MATLAB R2014a 实验平台。实验数据来源于五台山佛光寺壁画的实地拍摄照片。本文截取了其中罗汉头部图片,裁剪生成大小均为  $160 \times 200$  的 86 幅数字图像。图像初始存储模式为 RGB 模式,大部分图像存在颜色脱落及颜色退化等病害。

算法1中有两个参数需人工设定,即第9步的阈值  $t$  和第3、第4步中的滤波模板尺寸  $k$ 。由于本文算

法用到的滤波模板为梯度运算模板,实验对象选用壁画中罗汉头部图像,该图像的梯度变化比较稀疏,相对于梯度变化稠密图像,滤波结果对  $k$  值的变化不敏感,但也不宜取过小或过大的值。 $k$  值过小滤波结果易受噪声影响,且无法检测到线条较宽的轮廓线; $k$  值过大则存在轮廓线丢失现象,且算法效率降低。阈值  $t$  为裁决像点最终是否为轮廓点的参数, $t$  值偏大会导致轮廓线丢失, $t$  值偏小会使轮廓线中纳入过多错误像点,导致最终线描图噪声严重。本文通过反复实验对比后取  $t$  值为 0.18、 $k$  值为 9 时效果最好。

### 3.1 色调补偿实验

为验证本文提出的色调补偿技术的有效性,本实验对大量罗汉壁画图像进行了基于复合梯度算子的 LoG 轮廓提取,并与原 LoG 算法的提取结果进行了对比。梯度运算和计算色调的邻域局部方差通过 MATLAB 库函数 `imfilter()` 和 `stdfilt()` 实现,根据原始图像尺寸,邻域大小均取了  $9 \times 9$ ,边界填充方式采取了零填充。图 4 为其中 5 幅样本图像的提取效果。

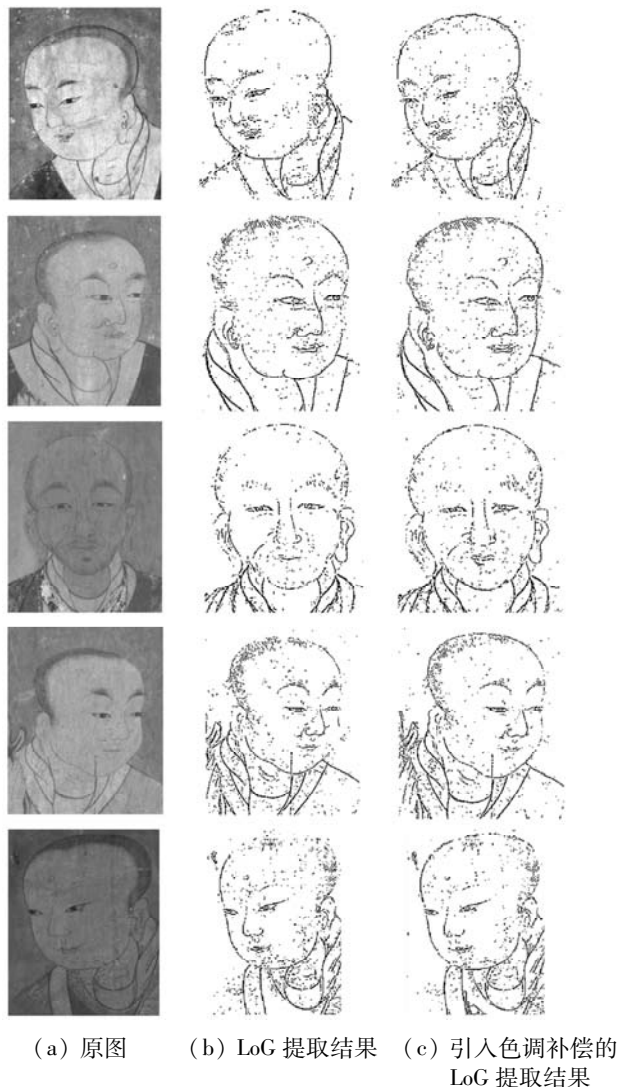


图 4 色调补偿实验效果对比

从图 4 可以看出,壁画图像中一些轮廓线沿梯度方向两侧像素的灰度值变化不明显,如图 4 中 5 幅图像的头顶部分轮廓线、第 2 与第 4 幅图像的右侧脸部轮廓线、第 3 幅图像的嘴部轮廓线等。若只用灰度梯度算子,上述位置的轮廓线无法得到完整检测,造成线描图线条不连续的问题,如图 4(b) 所示。人眼之所以能辨识到这些轮廓线,是由于颜色的差异做了更大的贡献。引入复合梯度算子后,这些部位因色调局部方差值大于灰度局部方差值,使得色调梯度值对提取轮廓的贡献增大,因而被识别为轮廓像素,避免了轮廓线断裂的问题,如图 4(c) 所示。

### 3.2 本文算法与其他算法对比

将本文算法与经典的 LoG 算法以及 Canny 算法的轮廓提取效果进行了比较,效果如图 5 所示。其中第 1 列为五台山壁画原图。第 2 列为采用文献[18]方法对壁画中平滑破损部分进行填充修复后的图像。第 3、4、5 列分别为采用 Canny 算法、传统的 LoG 方法以及本文改进方法对第 2 列修复图像进行轮廓提取后产生的线描图。其中第 3 列所示的 3 幅线描图是采用 Canny 方法并通过手工调试高低阈值得到的最佳观察结果,3 幅图像的低阈值分别为 0.13、0.19、0.15,高阈值分别为 0.24、0.30、0.28。由图 5 可见,Canny 算法产生的线描图的主要问题是笔道较粗时会产生双轮廓线。第 4 列用经典 LoG 方法避免了双轮廓线的问题,但存在线条不连续现象,且麻点较密。本文算法生成的线描图线条基本连续,且去除了平滑区域的大部分麻点。

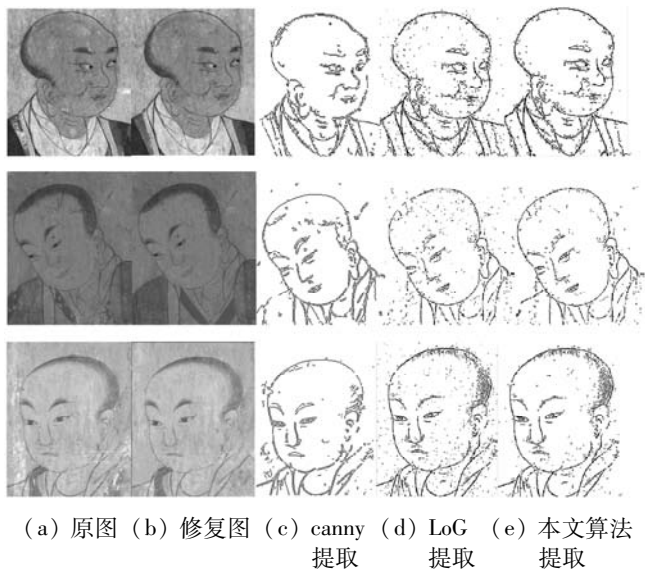


图 5 3 种算法提取效果比较

## 4 结 语

本文通过分析五台山壁画图像的特点,提出一种

基于改进梯度阈值的壁画人物线描图生成算法。在梯度计算过程中自适应地引入色调梯度算子,与原有的亮度梯度结合生成复合梯度算子,对原算法中因灰度缺失导致的轮廓线不连续问题有明显的改善;另外,针对初级线描图中错误边缘像素分布离散、聚合度小的特点,设计了两种卷积模板,对初级线描图进行二次卷积后可有效去除大部分的错误边缘像素。本文算法可针对壁画中罗汉头像部分生成较为清晰的线描图,这些线描图可为美术专业人员对壁画图像进一步分析提供素材,也可为壁画图像数字化处理和分析提供原始模板。

本文算法仅适用于梯度变化较稀疏的罗汉头部图像,对场景复杂且梯度变化稠密的大面积五台山壁画图像的线描图生成效果尚不理想。另外,通过对大量实验结果分析发现,算法在轮廓线的连续性及整体清晰性方面都有改善,尤其对提取结果中细小且分布离散的噪声点去除效果明显,但对聚集性的错误划分去除效果不明显。这些噪声尽管只是少量存在,但对后期研究及应用存在一定影响。通过分析,这些噪声点大多是由于壁画图像的病态造成的。

如何将去噪、修复技术与本文算法更好地融合,生成更干净的线描图;在本文算法基础上进一步研究,实现对包含复杂场景壁画图像的线描图生成等将是下一步研究的方向。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 王惠民. 数字化时代的敦煌壁画图像研究—以莫高窟第 72 窟北壁弥勒经变为例[J]. 敦煌研究,2019(4):26-37.
- [ 2 ] 范晓鹏,蔡铁峰,朱枫,等. 基于人眼亮度阈值特性的图像增强算法[J]. 光电子激光,2014,25(8):1606-1612.
- [ 3 ] 张婧,郭风成,左泽丹,等. 融合多方向 Sobel 算子的相干斑各向异性扩散抑制[J]. 遥感技术与应用,2023,38(5):1118-1125.
- [ 4 ] Prewitt J M. Object enhancement and extraction[J]. Picture Processing and Psychopictorics,1970,10(1):15-19.
- [ 5 ] Gong H X, Hao L. Roberts edge detection algorithm based on GPU[J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research,2014,6(7):1308-1314.
- [ 6 ] Xu H L. An improved edge detector based on the Laplacian operator[C]//6th International Congress on Image and Signal Processing,2014:416-421.
- [ 7 ] Utiupinar F, Medioni G. Refining edges detected by a LoG operator[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing,1990,51(3):275-298.
- [ 8 ] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679-698.
- [ 9 ] Mayur A I, Girish R T. Respiratory mask selection and leakage detection system based on Canny edge detection operator[J]. Procedia Computer Science,2016,78:323-329.
- [ 10 ] 李静,陈桂芬,丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究[J]. 计算机仿真,2021,38(4):371-375.
- [ 11 ] Xie S N, Tu Z W. Holistically-Nested edge detection[C]//IEEE International Conference on Computer Vision,2015:1395-1403.
- [ 12 ] Liu Y, Cheng M, Hu X W, et al. Richer convolutional features for edge detection[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2017:3000-3009.
- [ 13 ] Lyu H, Fu H, Hu X J, et al. Esnet: Edge-based segmentation network for real-time semantic segmentation in traffic scenes[C]//IEEE International Conference on Image Processing,2019:1855-1859.
- [ 14 ] 李永明. 计算机辅助壁画临摹技术研究及系统开发[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [ 15 ] 孙迪,张加万,詹睿,等. 敦煌壁画的线描图生成与辅助临摹应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(7):1321-1328.
- [ 16 ] 张琦. 基于图割理论的壁画分割方法研究[D]. 太原:太原科技大学,2020.
- [ 17 ] 许迪,刘阳,王秀锦. 面向中国古代壁画的线描画生成方法[J]. 计算机工程,2016,42(5):244-248.
- [ 18 ] 焦莉娟,王文剑,李秉婧,等. 改进的块匹配五台山壁画修复算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(1):118-125.
- (上接第 169 页)
- [ 16 ] 胡航天,刘凯,马士超,等. 专用指令集在基于 FPGA 的神经网络加速器中的应用[J]. 空间控制技术与应用,2020,46(3):36-41,54.
- [ 17 ] 张朝柱,韩吉南,燕慧智. 高速高精度固定角度旋转 CORDIC 算法的设计与实现[J]. 电子学报,2016,44(2):485-490.
- [ 18 ] 乔栋,陈章进,邓良,等. 基于改进语音处理的卷积神经网络中文语音情感识别方法[J]. 计算机工程,2022,48(2):281-290.
- [ 19 ] Zhang C, Li P, Sun G, et al. Optimizing FPGA-based accelerator design for deep convolutional neural networks[C]//2015 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays,2015:161-170.
- [ 20 ] 曾成龙,刘强. 面向嵌入式 FPGA 的高性能卷积神经网络加速器设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(9):1645-1652.
- [ 21 ] Lou W, Wang C, Gong L, et al. RV-CNN: Flexible and efficient instruction set for CNNs based on RISC-V processors[C]//International Symposium on Advanced Parallel Processing Technologies,2019:3-14.
- [ 22 ] 黄瑞,金光浩,李磊,等. 轻量化神经网络加速器的设计与实现[J]. 计算机工程,2021,47(9):185-190,196.