

## 基于梯度的快速图像插值算法

杨鹤猛<sup>1,2</sup>, 黄战华<sup>1,2\*</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(\* 通信作者电子邮箱 zhanhua@tju.edu.cn)

**摘要:**为解决传统插值算法效果不佳而新发展的边缘方向插值算法计算量大的问题,提出了一种基于梯度检测边缘的快速图像插值算法。该算法通过在原图像每一个 $3 \times 3$ 邻域内计算二阶梯度,检测边缘是否存在;若存在边缘,则计算一阶梯度判断边缘强弱并自适应得到权值因子,然后进行带权的线性插值;若不存在边缘,则在此邻域内进行双线性插值。实验结果表明,此算法不仅使插值后图像具备整体清晰性和边缘平滑性,有效保持了图像的主观视觉质量,而且相比现有同等效果的插值算法,运算时间至少能降低20%,尤其适用于嵌入式设备图像放大的应用。

**关键词:**图像放大;快速插值;带权插值;边缘检测;二阶梯度

**中图分类号:** TP391.413 **文献标志码:** A

### Fast image interpolation algorithm based on gradient

YANG He-meng<sup>1,2</sup>, HUANG Zhan-hua<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Optic-Electronics Information Technical Science of Education Ministry, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Traditional image interpolation algorithms have poor performance and most of the recently developed edge-directed interpolation algorithms are of high computation. To solve those problems, a fast image interpolation algorithm based on gradient distribution detection was proposed. The basic idea was to detect the existence of edges in each  $3 \times 3$  neighbourhood of the original low-resolution image by calculating its two-step gradients. If an edge existed, adaptive weighted factor up to edge strength was obtained by calculating its one-step gradient, and then the weighted linear interpolation was implemented. Otherwise, bilinear interpolation was carried through in that neighbourhood. The experiments show that the proposed algorithm is able to not only keep the subjective visual quality of the interpolated high-resolution image with whole clarity and edge smoothness, but also reduce the operation time by at least 20% compared with the equivalent algorithms now available. It contributes to an image enlargement application in embedded systems.

**Key words:** image enlargement; fast interpolation; weighted interpolation; edge detection; two-step gradient

## 0 引言

随着多媒体技术的发展,数字图像越来越广泛地应用于各个领域,各种显示设备对图像的分辨率要求也越来越高。高分辨率图像可以提供更多的图像细节信息供人眼观察或后续处理,然而目前在用的大量图像获取设备只能得到较低分辨率的图像,更换硬件设备则需投入更多成本,甚至带来更高的功耗,而且新设备分辨率也不可能无限提高。一种有效的解决方案是对低分辨率图像进行插值放大,以适应高分辨率显示设备<sup>[1-2]</sup>。

传统的插值方法有最近邻插值,多项式插值,样条插值等,它们的实现相对简单,但会出现方块效应、锯齿效应、低通效应等,使得插值后图像整体清晰度下降或者边缘变得不平滑和不自然<sup>[3-5]</sup>。实际上人眼对图像灰度突变处(即边缘)像素比较敏感,如果在插值放大的同时保护好图像中的边缘细节,就能使插值后图像具有良好的质量<sup>[6]</sup>。近年来发展了很多基于边缘信息的插值算法,这类算法考虑了图像边缘灰度分布,对边缘区和非边缘区采用不同的插值策略,效果相对好<sup>[7-8]</sup>,但计算过于复杂,很难满足实时条件下的应用<sup>[9-10]</sup>。

为此,本文提出一种基于梯度检测图像边缘分布的快速插值放大算法,利用邻域内像素二阶梯度和一阶梯度信息可

以快速检测边缘是否存在以及边缘强弱程度,根据检测到的边缘分布进行带权线性插值,结合边缘导向插值效果好和线性插值速度快的优点,在保证插值后图像质量的同时实现了快速插值。

## 1 基于梯度的图像快速插值算法

算法设计需兼顾有效性和实时性,线性插值速度很快但会引起边缘模糊,这是因为它只考虑了待插值点位置因素,没有考虑邻域像素灰度分布情况。若能在插值过程中快速检测当前邻域内是否存在边缘以及边缘强弱程度,并根据边缘分布情况进行自适应权值的线性插值,则可以在保证插值效果的同时提升算法的速度<sup>[11-12]</sup>。

边缘的形成主要取决于相邻像素灰度变化快慢,而非变化本身,故引入二阶梯度来检测边缘存在性<sup>[13-14]</sup>。图1(a)为原始低分辨率图像一个 $3 \times 3$ 邻域,  $I_{ori}(i, j)$  代表了中心像素的灰度,邻域内包含 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向的二阶梯度,其计算公式分别为:

$$d_0 = |(I_{ori}(i, j-1) + I_{ori}(i, j+1))/2 - I_{ori}(i, j)| \quad (1)$$

$$d_{45} = |(I_{ori}(i-1, j+1) + I_{ori}(i+1, j-1))/2 - I_{ori}(i, j)| \quad (2)$$

$$d_{90} = |(I_{ori}(i-1, j) + I_{ori}(i+1, j))/2 - I_{ori}(i, j)| \quad (3)$$

收稿日期: 2012-04-09; 修回日期: 2012-05-23。 基金项目: 国家863计划项目(2008AA04Z134)。

作者简介: 杨鹤猛(1985-), 男, 河北辛集人, 博士研究生, 主要研究方向: 红外视频成像系统及其处理算法; 黄战华(1965-), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向: 光电信息检测、图像处理。

$$d_{135} = |I_{ori}(i-1, j-1) + I_{ori}(i+1, j+1) / 2 - I_{ori}(i, j)| \quad (4)$$

取其中最大二阶梯度值记为  $V_{max}$ , 最小二阶梯度值记为  $V_{min}$ 。若  $V_{max}$  与  $V_{min}$  之差小于阈值  $TH$ , 则认为此邻域无边缘, 否则存在边缘, 且此时  $V_{min}$  为最强边缘方向, 邻域内不可能同时存在四个边缘, 同时存在两个或三个边缘的概率也很低, 为方便计算不考虑此类情形。

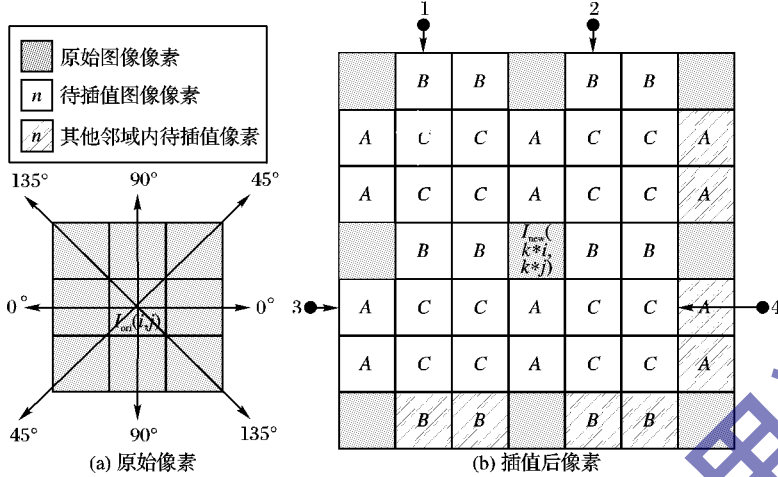


图1 图像内  $3 \times 3$  邻域三倍放大示意图

上述过程可以很快检测到边缘是否存在, 若不存在则对待插值图像中已知灰度像素进行线性插值, 若存在还需判断边缘方向, 并沿边缘方向线性插值, 沿与边缘正交的方向计算一阶梯度检测边缘强弱, 从而估计权值因子进行带权线性插值<sup>[15]</sup>。图1(b)为原图像  $3 \times 3$  邻域像素直接映射到待插值图像后的像素分布, 可见已知灰度的像素点变得间断。假设原图像为  $I_{ori}(i, j)$ , 放大整数倍  $k$  后待插值图像为  $I_{new}(k*i, k*j)$ , 直接映射公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1, k*(j-1)+1) = I_{ori}(i, j) \quad (5)$$

进一步对未知灰度待插像素点求值即可完成插值。根据位置分布关系, 将  $(2k+1) \times (2k+1)$  邻域待插点分成1, 2, 3, 4四个区, 每个区又分为A, B, C三类, 图1(b)内以  $k=3$  为例标示, 不失一般性。四个区呈几何对称分布故具有相似性, 只需考虑一个区在不同边缘分布情况下三类待插点的计算问题, 其余区进行类似计算即可。

以第4区为例, 若邻域内无边缘进行线性插值, A, B, C类待插点的插值公式均为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [((k-a)*I_{ori}(i, j) + a*I_{ori}(i+1, j)) * (k-b) + ((k-a)*I_{ori}(i, j+1) + a*I_{ori}(i+1, j+1)) * b] / k^2 \quad (6)$$

其中  $a, b \in [0, k-1]$ , 且均取整数, 对于A类有  $a \in [1, k-1]$ ,  $b=0$ ; 对于B类  $a=0$ ,  $b \in [1, k-1]$ ; 对于C类有  $a, b \in [1, k-1]$ , 对以下各式也相同。

若邻域内存在边缘则进行带权线性插值, 先判断边缘方向。

1) 若边缘为  $0^\circ$  方向, 插值公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [((k-a)*I_{ori}(i, j) + (W+a-k)*I_{ori}(i+1, j)) * (k-b) + ((k-a)*I_{ori}(i, j+1) + (W+a-k)*I_{ori}(i+1, j+1)) * b] / k/W \quad (7)$$

$W$  为带权调整因子, 它的取值决定于边缘像素和其邻近像素的一阶梯度, 放大倍数  $k$  和削弱因子  $GF$ 。

对A类待插点, 可令  $GF = TH/2$ , 有:

$$W = |I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i+1, j)| / GF + k \quad (8)$$

对B类待插点沿边缘进行线性插值,  $W$  取  $k$  值, 插值公式退化式(6)。

对C类待插点, 可令  $GF = TH$ , 有:

$$W = (|I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i+1, j)| + |I_{ori}(i, j+1) - I_{ori}(i+1, j+1)|) / GF + k \quad (9)$$

可见,  $W \in [k, 255/GF + k]$ , 它削弱了插值式(7)中边缘像素点灰度  $I_{ori}(i, j)$  对应的系数权值, 削弱程度由  $GF$  决定。 $GF$  远大于255时  $W$  为  $k$ , 此时即为线性插值系数,  $GF$  接近于255或者远小于255时, 插值系数带权值, 权值由一阶梯度决定。总之,  $W$  反映了相邻像素灰度分布并可调整灰度分布权重, 保证了边缘的清晰性, 对以下各式  $W$  取法类似。

2) 若边缘为  $90^\circ$  方向, 插值公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [((k-b)*I_{ori}(i, j) + (W+b-k)*I_{ori}(i, j+1)) * (k-a) + ((k-b)*I_{ori}(i+1, j) + (W+b-k)*I_{ori}(i+1, j+1)) * a] / k/W \quad (10)$$

对A类待插点沿边缘进行线性插值,  $W$  取  $k$  值, 插值公式仍为式(6)。

对B类待插点, 令  $GF = TH/2$ , 有:

$$W = |I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i, j+1)| / GF + k \quad (11)$$

对C类待插点, 令  $GF = TH$ , 有:

$$W = (|I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i, j+1)| + |I_{ori}(i+1, j) - I_{ori}(i+1, j+1)|) / GF + k \quad (12)$$

3) 若边缘为  $45^\circ$  方向, A类待插点的插值公式为式(7), B类待插点的插值公式为式(10), C类待插点的插值公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [((k-a+k-b)*I_{ori}(i, j) + (2*W+a+b-k-k)*I_{ave})] / 2/W$$

$$I_{ave} = [I_{ori}(i+1, j) + I_{ori}(i, j+1) + I_{ori}(i+1, j+1)] / 3 \quad (13)$$

令  $GF = TH/3$ , 式(13)中  $W$  为:

$$W = (|I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i+1, j)| + |I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i, j+1)| + |I_{ori}(i+1, j) - I_{ori}(i+1, j+1)|) / 3/GF + k \quad (14)$$

4) 若边缘为  $135^\circ$  方向, A类待插点的插值公式为式(7), B类待插点的插值公式为式(10), 此时C类待插点中又分三类:

若  $b=a$ , 沿边缘进行线性插值, 插值公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [(k-a+k-b)*I_{ori}(i, j) + (a+b)*I_{ori}(i+1, j+1)] / 2/k \quad (15)$$

否则  $b \neq a$ , 插值公式为:

$$I_{new}(k*(i-1)+1+a, k*(j-1)+1+b) = [(2*W-k-|b-a|)*I_{ave} + (k+|b-a|)*I_{ori}(i, j+1)] / 2/W$$

$$I_{ave} = [I_{ori}(i, j) + I_{ori}(i+1, j+1)] / 2 \quad (16)$$

若  $b > a$ , 式(16)中  $W$  为:

$$W = (|I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i, j+1)| + |I_{ori}(i+1, j+1) - I_{ori}(i, j+1)|) / 2/GF + k \quad (17)$$

若  $b < a$ , 式(16)中  $W$  为:

$$W = (|I_{ori}(i, j) - I_{ori}(i+1, j)| + |I_{ori}(i+1, j+1) - I_{ori}(i+1, j)|) / 2/GF + k$$

$$I_{\text{out}}(i+1, j+1) = I_{\text{in}}(i, j) + k \quad (18)$$

经过上述过程即完成一个邻域内插值。依次平移邻域模板重复上述过程,直到扫描完整幅待插值图像,并对边界遗漏部分进行线性插值,可完成图像的插值放大。

上述插值过程以行和列均放大整数  $k$  倍进行描述,显然对于  $k$  为小数或者行和列放大倍数不等时算法同样适用,此时考虑将待插点映射回原图像进行计算比较方便。关于阈值  $TH$  的选取,可选定一个合理水平上的经验值或进一步提取局部特征自适应得到,取决于系统对插值速度和精度要求。

## 2 实验结果与分析

为验证算法,对 Lena 面部和文本图像分别进行了 3 倍和 2 倍放大实验,并跟传统的插值算法进行了比较。

各插值算法效果比较如图 2、3 所示。可见,最近邻插值虽然保有图像的整体清晰度,但插值后图像变得不平滑,边缘出现了锯齿。双线性插值一定程度上保证了图像的平滑,但整体变得模糊,细节信息丢失严重。双立方插值克服了上述两种算法缺点,在保持图像整体清晰平滑的同时保有很多细节,只出现轻微的模糊,具有较好的效果。本文插值算法在  $TH = 30$  时整体视觉效果和双立方插值相当,但因为插值过程中考虑了局部梯度分布情况,在保持整体平滑的同时细节部分看起来更加明晰。本文插值算法在  $TH = 150$  时部分细节出现退化,图像变得模糊,但仍好于双线性插值,这也符合公式中  $TH$  趋于无穷大时算法退化为双线性插值的理论预期。

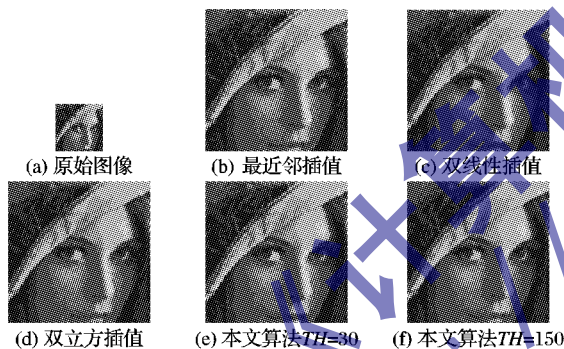


图2 不同算法对面部图像三倍插值放大效果图

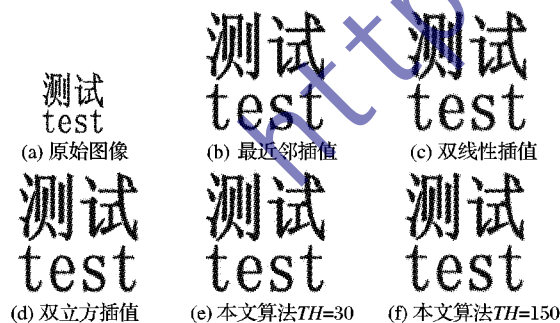


图3 不同算法对文本图像两倍插值放大效果图

图 4(a) 为实验室研制的基于 TMS320C6416T 最小系统电路板,在工作主频为 600 MHz 下进行了算法时间复杂度验证实验。以图 2 和 3 的过程为例,读入原图像数据后,分别循环运行各插值算法 1 000 次,每次开始运行置某 (General Purpose Input/Output) GPIO 口为高电平,运行完毕置该 GPIO 口为低电平,利用示波器观测平均周期乘以占空比即为算法的运行时间。图 4(b) 为示波器某次测量过程的截图。

可见,最近邻插值用时最少,其次为双线性插值,但这两种算法插值效果均不理想。双立方插值效果较好,但最耗时。本文插值算法在  $TH$  取较小值时,效果和双立方插值相当甚

至更好,但运行时间明显减少,经多次实验测量,相比双立方插值等具有同等效果的插值算法,本算法的运行时间能降低至少 20%;在  $TH$  取较大值时,效果会有所下降,但仍优于最近邻和双线性插值,且运行时间也得以进一步降低。

本文算法的运行时间主要取决于  $TH$  的大小和原始图像的梯度分布情况。在算法实施时,进行硬软件方面的优化可进一步减少运行时间<sup>[16]</sup>。

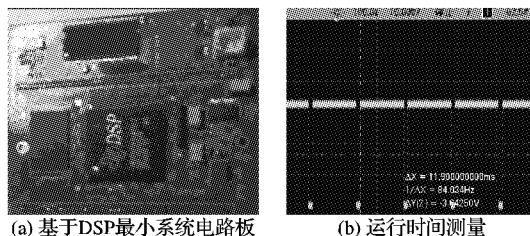


图4 算法运行时间测量示意图

各插值算法在上述平台下测量的运行时间如表 1 所示。

表1 各插值算法对面部和文本图像放大的运行时间比较表

插值算法	运行时间/ms	
	面部图像 ×3	文本图像 ×2
最近邻	11.9	6.5
双线性	103.5	47.4
双立方	172.2	78.5
本文算法( $TH = 30$ )	138.6	58.9
本文算法( $TH = 150$ )	114.0	52.3

## 3 结语

本文提出一种基于梯度检测边缘的图像插值算法,根据待插值点邻域内梯度信息检测边缘分布情况,然后采用带权值的线性插值,由于权值充分综合了待插点的位置和灰度分布信息,能够使算法获得很好的插值效果。算法代码实现相对复杂,处理分支较多,但不需提取出边缘,根据梯度信息可以快速检测边缘分布,且对每一待插点只会选择一个处理分支进行线性级运算量的灰度计算,实质上是一种空间换时间的设计思想,因此可以在获得比传统插值算法更佳效果的同时实现较快速的插值,尤其适用于对实时性要求高的嵌入式系统。目前只研究了算法对灰度图像的放大,对彩色图像的适用性以及算法的优化是下一步待研究的问题。

### 参考文献:

- [1] 符祥,郭宝龙. 图像插值技术综述[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1): 141-144.
- [2] 梁云,朱为鹏,李峥. 基于几何分类的自适应图像插值算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(4): 11-16.
- [3] 党向盈,吴锡生,赵勇. 基于边缘最大相关性的快速图像插值算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 2880-2883.
- [4] FENG XIAOJUN, ALLEBACH J P. Segmented image interpolation using edge direction and texture synthesis[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. San Diego: IEEE, 2008: 881-884.
- [5] 张海员,蔡念,张楠. 基于加权抛物线插值误差补偿算法的图像放大[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(25): 194-197.
- [6] 冯象初,姜东焕,徐光宝. 基于变分和小波变换的图像放大算法[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 340-345.
- [7] 孙春风,袁峰,丁振良. 一种新的边缘保持局部自适应图像插值算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2279-2284.
- [8] SHAN QI, LI ZHAORONG, JIA JIAYA, et al. Fast image/video up-sampling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1531-1537.

(下转第 2826 页)



数,将检测目标的时间缩短了 11.39 s,提高了目标检测算法的效率。基于 SIFT 特征匹配和全局运动补偿的方法实验所需时间与本文提出的方法相当,但是检测到的目标位置没有本文提出的方法精确,这是因为在实验过程中对两帧图像所做的差分运算,将运动目标在两帧图像上的位置叠加在了一起,扩大了二值化图像上目标的尺寸,导致检测到的目标比实际的目标大。

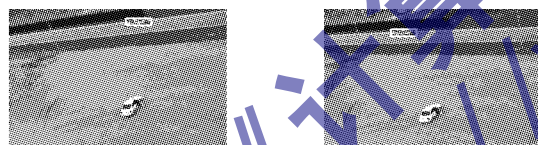
图 3 为运动摄像机拍摄的室外场景中多个车辆视频的运动目标检测实验结果,摄像机存在水平运动,视频大小为  $240 \times 320$ ,在第一帧图像上提取出 1667 个特征点。利用基于 SIFT 特征匹配和全局运动补偿的方法检测目标的实验结果如图 3(a) 所示,检测目标所需时间为 7.98 s;图 3(b) 为本文提出的算法的实验结果,根据目标运动速度,取相邻帧间隔为 8 帧,经过 2 次匹配,在第 17 帧检测到目标,所需时间为 6.8 s。



(a) 基于SIFT特征匹配和全局运动补偿 (b) 本文算法

图3 室外场景多个目标检测结果

图 4 展示了低空无人机拍摄的视频中运动目标检测的结果,摄像机存在水平和垂直方向的运动以及旋转运动,视频大小为  $380 \times 600$ ,画面中的白色车是静止的,第一帧图像上有 765 个 SIFT 特征点。图 4(a) 为利用基于 SIFT 特征匹配和全局运动补偿的方法的实验结果,检测目标所需时间为 11.64 s;图 4(b) 为利用本文提出的算法所得结果,根据目标运动速度,从第一帧开始取相邻帧间隔为 8 帧,经过 3 次匹配,在第 25 帧检测到目标,实验所需时间为 9.16 s。



(a) 基于SIFT特征匹配和全局运动补偿 (b) 本文算法

图4 低空中的视频目标检测结果

上述实验结果显示,由于 SIFT 特征点具有尺度、旋转不变性,且对亮度变化不敏感,本文提出的算法也适用于摄像机存在复杂运动的情况下的目标检测。与基于 SIFT 特征匹配和全局运动补偿的方法相比,本文提出的算法检测到的运动目标区域更精确,检测目标所需时间稍有减少。

## 5 结语

本文提出的运动目标检测方法在 SIFT 特征匹配的基础

上减少了提取 SIFT 特征的图像帧数和图像匹配的次数,与 SIFT 特征匹配算法相比,缩短了检测目标所需的时间,并且保留了目标上更多稳定的特征点,有利于在跟踪阶段的利用。与基于 SIFT 特征匹配和全局运动补偿的方法相比,检测所需时间略短,检测到的运动目标区域更精确。

## 参考文献:

- [1] DORETTO G, CHIUSO A, WU Y N, *et al.* Dynamic textures[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 51(2): 91 - 109.
- [2] 曹银花, 李林, 郜广军, 等. 动摄像机和动目标跟踪模式下的目标检测新方法[J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 276 - 278.
- [3] RADKE R J, ANDRA S, AL-KOFAHI O, *et al.* Image change detection algorithms: a systematic survey[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(3): 1 - 14.
- [4] ELHABIAN S Y, EL-SAYED K M, AHMED S H. Moving object detection in spatial domain using background removal techniques state of art[J]. *Recent Patents on Computer Science*, 2008, 1(1): 32 - 54.
- [5] 朱碧婷, 郑世宝. 基于高斯混合模型的空间域背景分离法及阴影消除法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(10): 1906 - 1909.
- [6] ELGAMMAL A, DURAISWAMI R, HARWOOD D, *et al.* Background and foreground modeling using nonparametric kernel density estimation for visual surveillance[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(7): 1151 - 1163.
- [7] KATO J, WATANABE T, JOGA S, *et al.* An HMM-based segmentation method for traffic monitoring movies[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(9): 1291 - 1296.
- [8] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]// *ICCV'99: Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999, 2: 1150 - 1157.
- [9] YU XIA-QIONG, CHEN XIANG-NING, XU HONG-QING, *et al.* Moving object detection from moving camera sequences[C]// *Proceedings of the Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation*, SPIE 7544. [S. l.]: SPIE, 2010: 381 - 386.
- [10] 王亮芬. 基于 SIFT 特征匹配和动态更新背景模型的运动目标检测算法[J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(2): 267 - 270.
- [11] 王梅, 屠大维, 周许超. SIFT 特征匹配和差分相乘融合的运动目标检测[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 892 - 899.
- [12] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]// *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. [S. l.]: IEEE, 1967: 281 - 297.
- [13] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91 - 110.

(上接第 2823 页)

- [9] 刘政林, 肖建平, 邹雪城, 等. 基于边缘的实时图像缩放算法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(2): 225 - 229.
- [10] 龚昌来. 一种基于数据融合的图像插值算法[J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 103 - 107.
- [11] GIACHETTI A, ASUNI N. Real-time artifact-free image upscaling[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(10): 2760 - 2768.
- [12] HWANG J W, LEE H S. Adaptive image interpolation based on local gradient features[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(3): 359 - 362.
- [13] KRYLOV A, NASONOV A. Edge-directed image interpolation using color gradient information[C]// *Proceedings of 16th International*

*Conference on Image Analysis and Processing-Part II*, LNCS 6979. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 40 - 49.

- [14] MURESAN D D. Fast edge directed polynomial interpolation[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. Arlington: IEEE, 2005: 990 - 993.
- [15] SUN JIAN, XU ZONGBEN, SHUM EUNG-YEUNG. Image super-resolution using gradient profile prior[C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Anchorage: IEEE, 2008: 1 - 8.
- [16] 王杰, 李洪兴, 王加银, 等. 一种图像快速线性插值的实现方案与分析[J]. *电子学报*, 2009, 37(7): 1481 - 1486.