doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.030

基于改进几何活动轮廓模型的母猪红外图像分割算法*

马　丽[1,2]　段玉瑶[1]　宗　泽[1]　刘　刚[1]

(1.中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083;
2.河北农业大学信息科学与技术学院,保定 071001)

摘要:基于母猪热红外视频在线检测的实时性和稳健性,提出了一种快速高效的母猪热红外图像轮廓分割方法。采用点运算进行对比度增强,去除大部分背景像素,减少图像数据处理量,减弱热红外图像中复杂背景的干扰;提出了能够随着图像整体对比度和局部对比度变化的权值函数,从而动态地均衡图像全局能量和局部能量的权重;结合 LGIF 模型,建立了一个改进权值的 LGIF 活动轮廓模型。应用不同分割方法对在不同姿态、不同光照、不同品种情况下拍摄的 300 幅母猪热红外图像进行试验,结果分析表明,所提方法能更高效地将母猪轮廓从养殖场猪圈环境中提取出来,单幅图像平均分割时间为 49.67 s,正确分割率达到 98% 以上,研究结果可为后续基于在线红外视频监测研究提供技术支撑。

关键词:母猪　图像分割　活动轮廓　LGIF 模型　对比度增强

中图分类号:TP391　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)S0-0180-07

Segmentation of Thermal Infrared Image for Sow Based on Improved Convex Active Contours

Ma Li[1,2]　Duan Yuyao[2]　Zong Ze[1]　Liu Gang[1]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Information Science and Technology*, *Agricultural University of Hebei*, *Baoding* 071001, *China*)

Abstract: In order to solve the on-line detection of the body surface temperature for sow based on thermal infrared video, the image segmentation method for the fast and efficient target detection was proposed. The thermal infrared image of the sow has the features of low pixel, low contrast and edge blur. In piggery environment conditions, the sow body temperature and background radiance were the main factors to affect thermal infrared image brightness and handling results. Because of the strong correlation between the intensity of the background radiation and light intensity, in order to study the effect of background radiation on the thermal infrared image segmentation, the thermal infrared images of different illumination intensities were collected. Firstly, the point operation was used to enhance the contrast enhancement; and then, instead of a constant value for ω, a weight function that varies dynamically with the global and local contrast of the image was chosen, so as to dynamically balance the global energy and the local energy; finally, an improved LGIF model was established with the global fitting energy and the local energy. 300 thermal infrared images were collected by using infrared thermal imaging system, and the image segmentation experiments were performed. These pictures were taken in different positions, light conditions, and sow varieties. Classification tests were carried out under three conditions of low light intensity (100 ~ 600 lx), middle illumination (600 ~ 1 000 lx) and high illumination (1 500 ~ 2 500 lx).

收稿日期:2015-10-28　修回日期:2015-11-12

*北京市科委计划资助项目(D141100003814003)

作者简介:马丽,博士生,河北农业大学讲师,主要从事图像视频处理、农业物联网应用研究,E-mail:gotoml@hebau.edu.cn

通讯作者:刘刚,教授,博士生导师,主要从事农业信息化应用研究,E-mail:pac@cau.edu.cn

In order to analyze the accuracy and real-time performance of the algorithm, the average running time and the correct segmentation rate of different segmentation algorithms were calculated respectively. The cause of the poor effect of the partial sample was analyzed, and the direction of improvement was put forward. Experimental results show that the improved method can extract the sow more efficiently, and the average single image segmentation time was 49.67 s, the correct segmentation rate reached more than 98% which demonstrated the accuracy and superiority of the proposed model.

Key words: Sow　Image segmentation　Active contour　LGIF model　Contrast enhancement

引言

体温是机体内在活动的客观反映，是衡量母猪是否健康的有效手段之一。母猪体温自动检测技术用于母猪健康状况的监测、评估及预警报警，可提升畜牧生产业的自动化水平，并为畜牧兽医、畜牧设施装备信息化等领域的科学研究提供技术支持[1-3]。同时，该技术可避免母猪应激，提高母猪福利养殖水平。目前，我国大部分养殖场和科研机构测量生猪体温的方法是采用传统的普通兽用水银体温计人工采集生猪的直肠温度，这种方法使生猪产生较大应激，测试人员耗时费力，同时存在人畜交叉感染的风险[4-6]。

红外热像仪测温技术的热灵敏度可达 0.1℃以内，具有测温准确、非接触的优点，国内外学者利用热红外技术进行了猪、牛等动物的体表温度的测量研究。Carsten 等[7]对生猪头部的热红外图像采用差分 ROI 法检测猪头部表面温度分布，试验表明这种方法具有约 85% 的高一致性和 86% 的感知率。Wirthgen 等[8-9]用热红外图像针对奶牛乳房炎症和奶牛蹄部损伤进行了检测，作为疾病预警依据。朱伟兴等[10-11]通过对单只生猪侧视图进行分割，研究了热红外图像与可见光的配准和融合算法，进一步针对单只生猪侧视图研究了生猪耳部区域检测方法[12]，结果表明自动检测区域和手动检测区域重合度大于 0.8 的检测结果占比达到 84%，部分样本重合度较低的原因是生猪姿态变化过大或融合图像二值分割效果过差，导致骨架匹配错误。以上研究表明，生猪的姿态、光照、拍摄角度等对图像处理的结果影响很大，需要一种适合各种情况的生猪图像检测方法，使算法更加稳健。

几何活动轮廓模型是一种应用偏微分方程进行图像分割的方法。它不仅可以实现复杂目标轮廓的分割，还可以直接处理图像中的梯度、曲率等几何特征，便于利用数值分析和偏微分方程等理论的成熟结果建立各种数学模型，获得较好、稳定的图像品质。几何活动轮廓模型在生物医学图像处理领域应用较多，近年来逐渐应用到运动跟踪领域。Mumford 等提出基于 Mumford-Shah[13] 最优分割的 CV 活动轮廓模型（由 Chan 和 Vese 提出），是经典的基于区域信息的模型，能处理曲线拓扑变化以及弱边界，但是初始化不敏感，难以处理非均质图像。Li 等提出了局部二值拟合能量模型（Local binary fitting energy, LBF）[14]，能处理非匀质图像，实现对三接合点的复杂拓扑结构分割，但是由于局部极值问题而使分割曲线不在目标边界上，处于远离目标边界的目标或背景区域内，且效率比 CV 模型低。进一步，Li 等[15]结合 CV 模型和 LBF 模型的优势，提出局部和全局能量驱动的模型（Local and global intensity fitting energy, LGIF），但是仍然存在多次高斯卷积、计算量大的问题，并且用来控制全局能量项和局部能量项的权重的系数常常要通过试验来确定，不能实现自动赋值。Zhang 等[16]提出了局部图像拟合模型（Local image fitting, LIF），降低了运算复杂度，但是初始轮廓的不同位置会影响分割的效果。

为了实现基于热红外图像的母猪体表温度检测，本文尝试研究一种在不同姿态、光照、拍摄角度变化下，鲁棒性良好的热红外图像快速分割算法。

1　材料和方法

1.1　图像采集及热红外图像分析

1.1.1　图像采集

热红外图像具有对比度低、有噪声干扰、目标和背景的分布区分很不明显的特点[17]。除红外探测系统本身的影响因素以外，影响热红外图像亮度的主要因素有测量目标本身的红外辐射亮度、路径的辐射亮度、大气透过率、目标有效探测面积、目标与探测器之间的距离、背景辐射亮度等[18]。在猪舍环境条件下，热红外图像亮度和处理效果的主要因素是母猪的体表温度和背景辐射亮度。背景辐射亮度与光照强度具有相关性，因此可以通过采集不同光照强度下的热红外图像来研究背景辐射对母猪热红外图像分割效果的影响。

试验所用图像于 2015 年 5—8 月在北京市西山长丰养殖场采集，猪舍尺寸约为 3 m × 4 m。试验的母猪品种为金华两头乌、杜洛克和黑六的杂交后裔。

用便携式红外热像仪采集的热红外图像分辨率为640 像素 ×480 像素。分别在低照度(100 ~ 600 lx)、中照度(600 ~ 1 000 lx)和高照度(1 500 ~ 2 500 lx)3 种光照条件下采集图片,如图 1 所示,每种光照分别采集 100 幅。



(a) (b)

图 1 图像采集

Fig. 1 Image acquisition

(a) 采集现场 (b) 热红外图像

1.1.2 热红外图像分析

为了检测母猪的体表温度,读取热红外图温度数据并保存为灰度图像,如图 2a 所示。观察图 2a 可知,母猪目标轮廓和细节不清晰,从其灰度直方图(图 2c)中可见灰度范围集中在 26 ~ 38 之间,图像整体对比度偏低,因此可采用灰度变换进行灰度增强[19]。灰度增强方程表达式为

$$g(x,y)=\begin{cases}\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}(f(x,y)-x_1)+y_1 & (x_1\leqslant f(x,y)\leqslant x_2)\\ 0 & (\text{其他})\end{cases} \tag{1}$$

式中 $f(x,y)$——原图像灰度

$g(x,y)$——输出图像灰度

$[x_1,x_2]$——原图像有待增强的灰度区间

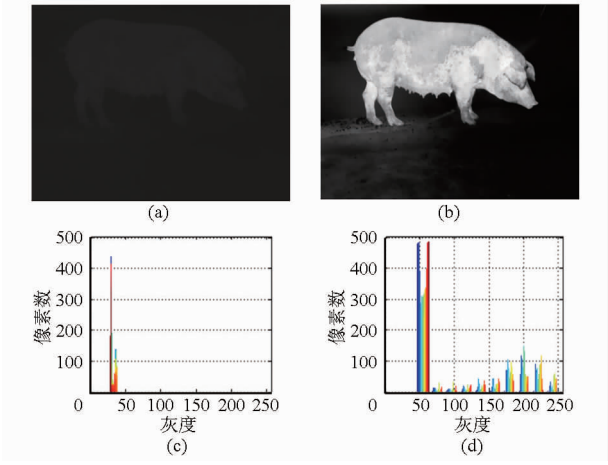
$[y_1,y_2]$——输出图像增强后的灰度区间

由于 5—8 月期间,母猪的体表温度在35 ~ 41℃之间(体表高温时,可能是由于光照母猪身体表面所致)[5],故取 $x_1=30$, $x_2=45$,作为温度分割阈值,上下限预留出温度活动空间。其它温度区间的背景被截止,从而避免了大部分背景辐射的干扰。

为了扩展温度分辨率,将温度区间扩大到便于人眼识别的[50, 250]区间,故温度输出参数取 $y_1=50$, $y_2=250$。增强后的灰度图像如图 2b 所示,凸显母猪的轮廓和细节,从而提高后续图像分割算法的准确度,其灰度直方图如图 2d 所示,图像的整体对比度得到提高。

1.2 图像分割

几何活动轮廓模型的理论基础是曲线进化理论和水平集。其主要思想是:将平面闭合曲线隐含地表达为高维曲面函数的零水平集,通过最小化能量泛函,将曲线的演化方程转换为高维曲面水平集函数的偏微分方程,通过迭代演化,使零水平集运动到目标轮廓上去。



(a) (b) (c) (d)

图 2 图像对比度增强前后对比

Fig. 2 Image contrast enhancement

(a) 原始热红外图像的灰度图 (b) 增强图像灰度图

(c) 原始热红外图像直方图 (d) 增强图像的直方图

常见的活动轮廓模型可分为 CV 模型、LBF 模型、基于局部区域的活动轮廓模型(Localizing region-based, LRB)等[20]。

1.2.1 LBF 模型

Li 等[14]提出了基于局部区域亮度信息的 LBF 模型,定义为:设定义在 Ω 上的图像 I 被活动轮廓线 C 划分为 inside(C)和 outside(C)两部分,c_1、c_2 分别表示图像在轮廓曲线内部和外部的灰度均值[21-22]。

LBF 模型总的能量泛函是

$$E^{\mathrm{LBF}}=\int_{\Omega}\varepsilon^{\mathrm{Fit}}\mathrm{d}x+\nu\int_{\Omega}\delta(\varphi)\,|H(\varphi)|\,\mathrm{d}x+\frac{1}{2}\mu\int_{\Omega}(|\nabla\varphi|-1)^2\mathrm{d}x=E^{\mathrm{LIF}}+\nu L(\varphi)+\mu P(\varphi) \tag{2}$$

式中 φ——零水平集

ν、μ——非负常量

$\delta(\varphi)$——Dirac 函数

$H(\varphi)$——Heaviside 函数

$L(\varphi)$——曲线长度函数

$P(\varphi)$——距离正则函数

$\varepsilon^{\mathrm{Fit}}$——局部能量函数

E^{LIF}——局部能量泛函

该模型将标准差为 σ 的高斯核函数引入 $\varepsilon^{\mathrm{Fit}}$ 局部能量泛函项。这个核函数在非均质图像分割中起非常重要的作用,使模型对初始轮廓敏感,从而影响最终的分割曲线的位置。

1.2.2 LGIF 模型

Wang 等[15]提出的基于图像局部和全局能量信息的 LGIF 模型,其总的能量泛函形式为

$$E^{\mathrm{LGIF}}(\varphi,c_1,c_2,f_1,f_2)=\omega E^{\mathrm{GIF}}+(1-\omega)E^{\mathrm{LIF}}+\nu L(\varphi)+\mu P(\varphi)\quad(0\leqslant\omega\leqslant1)\tag{3}$$

其中全局能量泛函为

$$E^{\mathrm{GIF}}=\lambda_1\iint_{\mathrm{inside}(C)}|I(x,y)-c_1|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\lambda_2\iint_{\mathrm{outside}(C)}|I(x,y)-c_2|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\tag{4}$$

式中　f_1——图像在边界 C 内 x 点处灰度拟合值

f_2——图像在边界 C 外 x 点处灰度拟合值

$I(x,y)$——图像在点(x,y)处的灰度

λ_1——曲线长度函数的权值

λ_2——距离正则函数

ω——全局能量函数的权值

固定式(3)中的 φ，分别对 c_1、c_2、f_1、f_2 取极小化，得到 c_1、c_2、f_1、f_2 的表达式为

$$c_1=\frac{\int I(x)H(\varphi)\mathrm{d}x}{\int H(\varphi)\mathrm{d}x}\tag{5}$$

$$c_2=\frac{\int I(x)(1-H(\varphi))\mathrm{d}x}{\int 1-H(\varphi)\mathrm{d}x}\tag{6}$$

$$f_1(x)=\frac{k(x)*(I(x)H(\varphi))}{k(x)*H(\varphi)}\tag{7}$$

$$f_2(x)=\frac{k(x)*[I(x)(1-H(\varphi))]}{k(x)*(1-H(\varphi))}\tag{8}$$

式中　$I(x)$——图像在 x 处的灰度

$k(x)$——高斯核函数

对式(3)采用变分原理和梯度下降法求解，得最终曲线的演化方程

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=-\delta(\varphi)(F_1+F_2)+\nu\mathrm{div}\left(\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right)+\mu\left(\Delta\varphi-\mathrm{div}\left(\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right)\right)\tag{9}$$

其中　$F_1=\omega[\lambda_1(1-c_1)^2-\lambda_2(1-c_2)^2]$　(10)

$$F_2=(1-\omega)\left[\lambda_1\int K_\sigma(x-y)(I(y)-f_1(x))^2-\lambda_2\int K_\sigma(x-y)(I(y)-f_2(x))^2\right]\tag{11}$$

式中　k_σ——标准偏差为 σ 的高斯核

1.2.3　LGIF 模型的改进

在 LGIF 模型中，由式(3)可见，参数 ω 是用来控制 E^{GIF} 全局能量项和 E^{LIF} 局部能量项的权重。图像灰度的均匀程度决定了 ω 取值的大小。当图像灰度变化剧烈时，E^{LIF} 更加影响分割结果的准确度，应增加 E^{LIF} 的权重，故 ω 应取值偏小；当图像灰度比较均匀时，E^{GIF} 更加影响分割结果的准确度，应增加 E^{GIF} 的权重，故 ω 应取值偏大。

对于一幅给定的图像，ω 常常是一个给定的常数，这个常数通常根据图像的灰度均匀程度，通过试验来确定。针对这一问题，本文对 ω 的选取进行了改进。

1.2.4　模型描述

将 ω 定义为一个根据区域灰度动态变化的函数

$$\omega=\beta\mathrm{average}(C_N)(1-C_N)\tag{12}$$

其中

$$C_N(x)=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}}\tag{13}$$

式中　β——固定参数

C_N——局部区域窗口尺寸为 N 的图像区域灰度相对对比度

$I_{\max}$——图像区域窗口内灰度最大值

$I_{\min}$——图像区域窗口内灰度最小值

1.2.5　改进分析

$C_N(x)$ 反映了区域范围内灰度变化的剧烈程度($0\leqslant C_N(x)\leqslant1$)。当区域灰度比较均匀时，$C_N(x)$ 偏小；当区域灰度比较剧烈时，$C_N(x)$ 偏大。

在式(12)中，average(C_N) 是整幅图像的 C_N 的平均值，它反映了图像的整体灰度均匀信息。对于一幅有灰度剧烈变化的图像而言，其目标与背景的边界相对比较明显，因此会增加图像的整体对比度，average(C_N) 会增大。同时，$(1-C_N)$ 项可以在所有区域内随着 C_N 项动态调整，使 ω 在高局部对比度区域内下变得更小，在低局部对比度区域内变得更大。因此，与 LGIF 模型固定 ω 参数相比，本文提出的算法，可以使 ω 在图像的不同局部区域内，根据该区域的局部对比度动态变化。

2　试验与结果分析

2.1　试验设备

试验使用 FLIR T620 型便携式红外热像仪，图像分辨率为 640 像素×480 像素。程序处理所用的计算机配置为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-16200@3.60 GHz，16 GB 内存，Windows 7 操作系统。

2.2　图像分割效果对比分析

试验选择不同方位拍摄的 300 幅母猪热红外图像进行试验分析，按照低、中和高照度 3 种情况进行分类试验。在 Matlab 2014a 编程环境下测试分割算法。

2.2.1　不同光照条件下的图像分割效果

为了测试各种分割算法的分割效果，分别将传统的 OTSU 法和 LBF 法、本文方法的分割效果进行对比。图 3～5 显示了 3 种光照条件下的单只母猪的分割效果对比图。

试验结果表明：

(1) OTSU 法分割的结果是二值图像，此法对

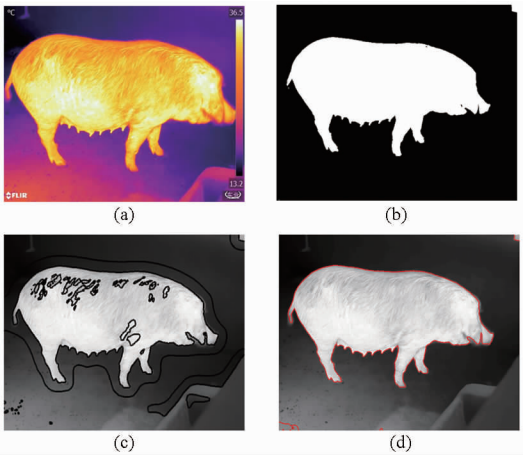


图 3 低照度下图像分割效果

Fig. 3 Image segmentation effect under low illumination

(a) 原图 (b) OTSU 法分割效果

(c) LBF 法分割效果 (d) 本文方法分割效果

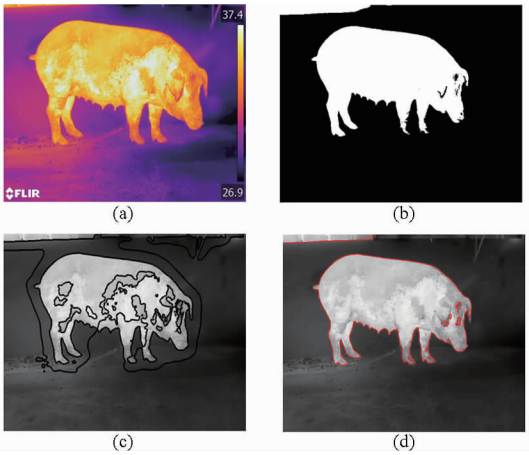


图 4 中照度下图像分割效果

Fig. 4 Effect of image segmentation under medium illumination

(a) 原图 (b) OTSU 法分割效果

(c) LBF 法分割效果 (d) 本文方法分割效果

单只母猪红外图像分割效果较好。随着光照强度的增加,母猪蹄部与地面边界不明显,分割效果逐渐减弱,如图 3b、4b、5b 所示。

(2) LBF 法分割的结果是用黑色实线标出分割的区域边缘。由于此法增加了区域局部特征,分割的效果受母猪及背景的纹理影响较大。如图 3c、4c、5c 所示,能够分割出母猪、母猪身体及背景的不均匀灰度的目标轮廓。但分割后的曲线位置受初始轮廓影响,还需要后续算法进一步提取母猪轮廓。

(3) 本文算法分割的结果是用红色细线标出分割的区域边缘。此法在不同光照下均准确地分割出母猪的边缘,并且受背景影响较小。

在 3 种不同照度下的分割算法正确率统计如表 1 所示。高定位精度是指检测出的边缘应在真正的边缘位置上。本文的评价标准以高于 95% 的定

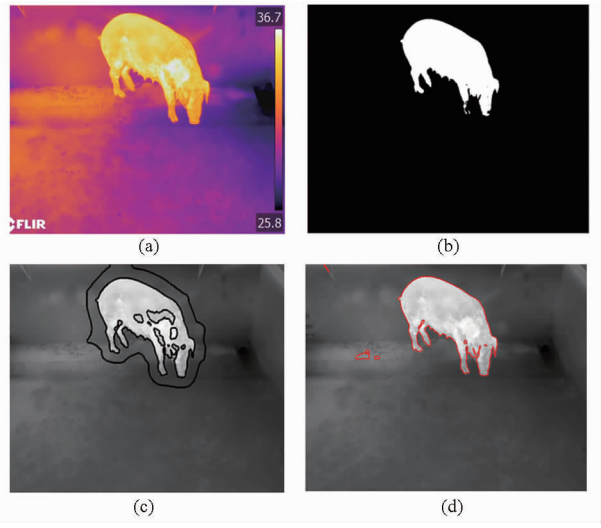


图 5 高照度下图像分割效果

Fig. 5 Image segmentation effect under high illumination

(a) 原图 (b) OTSU 法分割效果

(c) LBF 法分割效果 (d) 本文方法分割效果

位精度作为准确分割出的母猪边缘轮廓。分割比例为准确分割出的母猪边缘轮廓的图像数占总图像数的百分比。

表 1 3 种光照下的母猪分割情况统计

Tab. 1 Segmentation accuracy with three different illuminations

光照情况	原图数	正确分割数			分割比例/%		
		OTSU	LBF	本文方法	OTSU	LBF	本文方法
低照度	100	84	90	100	84	90	99
中照度	100	84	84	98	78	84	98
高照度	100	64	80	98	64	80	98
平均值					75.33	84.67	98.33

表 1 表明,3 种算法在低照度下的正确分割率均最高,分割比例均在 80% 以上; 3 种算法在高照度情况下的正确分割率都偏低。这说明光照对 3 种图像分割算法均有影响。其中本文方法受光照影响最小,分割比例均在 98% 以上。OTSU 算法的结果受光照影响最大,高照度下分割比例仅为 64%。这是由于光照强烈时,背景辐射比较大,致使热红外图像中母猪的边界不明显或被破坏,致使分割效果差。

2.2.2 算法速度和算法稳健性对比

为对比分析算法的速度,计算不同分割算法平均程序运行时间分别为:OTSU 算法 0.157 1 s、LBF 算法 87.875 4 s、本文方法 49.668 7 s。为了便于比较,设置 LBF 和本文方法的迭代次数均为300 次。

为了对比分析算法的稳健性,测试各算法在多只母猪不同位姿下的分割效果。图 6 是 2 只互不相遮挡的母猪在中照度条件下的分割效果。图 7 是 2 只互相遮挡的母猪在中照度、复杂背景(存在粪便等排泄物)条件下的分割效果。

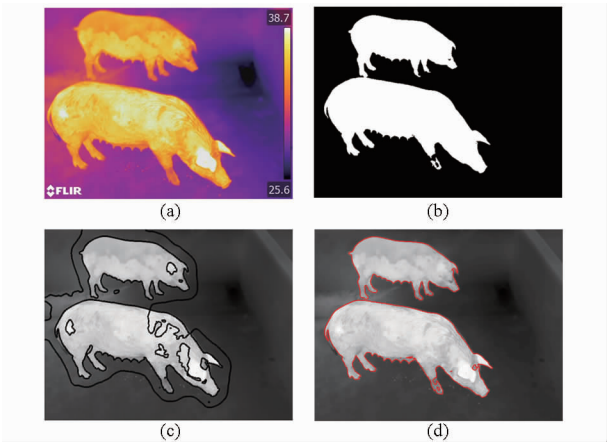


图 6　多只生猪中照度下图像分割效果

Fig. 6　Segmentation effect of multiple pig images under high illumination

（a）原图　（b）OTSU 法分割效果

（c）LBF 法分割效果　（d）本文方法分割效果

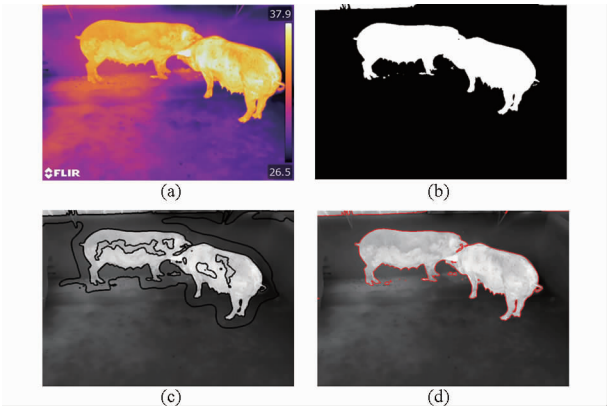


图 7　多只生猪复杂背景下图像分割效果

Fig. 7　Segmentation effect of multiple pig images under high illumination

（a）原图　（b）OTSU 法分割效果

（c）LBF 法分割效果　（d）本文方法分割效果

综合以上结果表明：

（1）本文分割算法虽然在运行时间上慢于 OTSU 法，但是在处理多只母猪的热红外图像时，可以避免遮挡的影响，准确分割出多个目标的轮廓，如图 6d、7d 所示。而 OTSU 法虽然运行速度最快，但是当母猪处于遮挡位姿时，会出现过分割的现象，如图 7b 所示。

（2）LBF 法分割效果较好，但是用时几乎为本文方法的 2 倍，计算效率差。

（3）采用本文方法，部分样本分割效果不佳，其原因分析如下：①图像背景的表面温度与母猪的体表温度区间内。如图 6d 所示，图中前景母猪的右前蹄部分被当成背景。如图 7d 所示，背景中的排泄物被当成目标，分割出来。②母猪之间的遮挡影响分割效果。应进一步寻求改进的分割算法，提高分割算法的鲁棒性。

3　结论

（1）针对母猪热红外图像，提出了一种改进的活动轮廓模型的高效图像分割算法，构建了新的对比度权值函数，从而自动地均衡了图像全局能量和局部能量在图像各区域的权重。

（2）根据母猪热红外图像的数值分布特点，提出了采用点运算增强对比度的方法，既不损失母猪图像数值，又可以去除大部分背景区域。

（3）通过 300 幅母猪热红外图像分割试验的对比分析，表明改进的 LGIF 模型能快速、准确地分割出目标图像，单幅图像的平均分割时间为 49.67 s，正确分割率达 98.33%，可以满足母猪日常监控的实时性需求。

（4）可进一步研究本文模型的抗遮挡能力，提高母猪运动跟踪的鲁棒性。

参　考　文　献

1　Kashiha M, Bahr C, Haredasht A S, et al. The automatic monitoring of pigs water use by cameras[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2013, 90: 164 – 169.

2　Peter A, Torben G, Henrik K. Development of a real-time computer vision system for tracking loo-housed pigs[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2011, 76: 169 – 174.

3　Mohammadamin K, Claudia B, Sanne O, et al. Automated monitoring of pig locomotion using image analysis[J]. Livestock Science, 2014, 159: 141 – 148.

4　韩雪昌，李洪洲，丁徐琦. 红外线体温仪在宰前检疫中的应用效果[J]. 浙江畜牧兽医, 2006(5): 40.

5　范映春. 红外线测温仪在动物检疫中的应用试验[J]. 浙江畜牧兽医, 2006(2): 30.

6　高利波，段纲，尹革芬，等. 红外线体温仪在生猪屠宰场体温筛检中的试用效果[J]. 中国畜牧兽医, 2010, 37(9): 235 – 237.

Gao Libo, Duan Gang, Yin Gefen, et al. Trial results of infrared thermometer in the application of ante-mortem body temperature screening in the pig slaughter house[J]. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2010, 37(9): 235 – 237. (in Chinese)

7　Carsten S, Sven D, Susanne K, et al. Difference method for analyzing infrared images in pigs with elevated body temperatures[J]. Medicine Physicss, 2014, 24(1): 6 – 15.

8 Wirthgen T, Lempe G, Zipser S, et al. Level-set based infrared image segmentation for automatic veterinary health monitoring[C]// Lecture Notes in Computer Science 7594, 2012 International Conference Computer Vision and Graphics Proceedings, 2012:685 – 693.

9 Wirthgen T, Zipser S, Franze Ulrike, et al. Automatic segmentation of veterinary infrared images with the active shape approach [C]// Lecture Notes in Computer Science 6688, Proceedings of 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2011:435 – 446.

10 刘波, 朱伟兴, 纪滨, 等. 基于射线轮廓点匹配的生猪红外与可见光图像自动配准[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 153 – 160.
Liu Bo, Zhu Weixing, Ji Bin, et al. Automatic registration of IR and optical pig images based on contour match of radial line feature points[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 153 – 160. (in Chinese)

11 刘波, 朱伟兴, 霍冠英. 生猪轮廓红外与光学图像的融合算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 113 – 120.
Liu Bo, Zhu Weixing, Huo Guanying. An image fusion algorithm of infrared thermal and optical images for pig contour[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 113 – 120. (in Chinese)

12 朱伟兴, 刘波, 杨建军, 等. 基于改进主动形状模型的生猪耳部区域检测方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 288 – 295.
Zhu Weixing, Liu Bo, Yang Jianjun, et al. Pig ear area detection based on adapted active shape model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 288 – 295. (in Chinese)

13 Mumford D, Shah J. Optimal approximation by piecewise smooth function and associated variational problems[J]. Communication on Pure and Applied Mathematics, 1989, 42(5): 577 – 685.

14 Li C, Kao C, Gore J, et al. Implicit active contours driven by local binary fitting energy [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1 – 7.

15 Wang L, Li C, Sun Q, et al. Active contours driven by local and global intensity fitting energy with application to brain MR image segmentation[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2009, 33(7): 520 – 531.

16 Zhang K, Song H, Zhang Lei. Active contours driven by local image fitting energy [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(4): 1199 – 1206.

17 于天河, 郝富春, 康为民, 等. 红外图像增强技术综述[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(9): 335 – 338.
Yu Tianhe, Hao Fuchun, Kang Weimin, et al. Summarization on the infrared image enhancement technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(9): 335 – 338. (in Chinese)

18 刘涛, 张炜, 何付军, 等. 红外热波检测方法图像增强环节研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1922 – 1927.
Liu Tao, Zhang Wei, He Fujun, et al. Research on image enhancement in infrared thermal waves NDT[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1922 – 1927. (in Chinese)

19 段丁娜, 张欢, 邱陈辉, 等. 基于活动轮廓模型的图像分割算法综述[J]. 中国生物医学工程学报, 2015, 34(4): 445 – 454.
Duan Dingna, Zhang Huan, Qiu Chenhui, et al. A review of active contour model based image segmentation algorithms[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2015, 34(4): 445 – 454. (in Chinese)

20 段立涛. 快速有效的全局和局部能量驱动的活动轮廓模型[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版, 2013, 30(2): 26 – 30.
Duan Litao. Fast and efficient active contours driven by local and global intensity fitting energy[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2013, 30(2): 26 – 30. (in Chinese)

21 Yunyun Y, Boying W. Convex image segmentation model based on local and global intensity fitting energy and split bregman method[J]. Journal of Applied Mathematics, 2012, 2012(1): 155 – 172.

22 RC 冈萨雷斯, P 温茨. 数字图像处理[M]. 2 版. 李淑梁, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.