

基于图像处理的生猪耳部颜色异常检测技术

周丽萍¹ 陈达² 陈志² 苑严伟¹ 王丽丽¹ 孙小文¹

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080)

摘要: 为研究规模化生猪养殖场中蓝耳病疫情预警监测方法, 提出一种非接触式耳部颜色自动检测方法。该方法将生猪热红外图像和可见光图像相结合寻找最优尺度因子, 确定可见光图像中生猪耳根部特征区域; 采用主动形状模型方法, 选取 34 个生猪耳部轮廓特征点, 并将搜索范围限定在生猪头部区域, 用以提取生猪耳部轮廓; 将提取的耳部轮廓进行颜色对比, 判断该生猪是否患有蓝耳病疫情。结果表明, 由于限定生猪头部区域搜索范围, 能快速准确地提取生猪耳部轮廓。对生猪耳部颜色检测准确率达到 77% 以上。

关键词: 生猪; 蓝耳病疫情; 尺度因子; 耳部轮廓; 搜索范围

中图分类号: TP391.41; S852.65⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0166-07

Pig Ear Abnormal Color Detection on Image Processing Techniques

ZHOU Liping¹ CHEN Da² CHEN Zhi² YUAN Yanwei¹ WANG Lili¹ SUN Xiaowen¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. China National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to study blue ear epidemic early warning and monitoring method in large-scale pig farms, the non-contact ear automatic color detection method was proposed. Pig's thermal infrared images and visual images were collected at the same time and the same viewing angle. Two pictures were used together to find the optimal scale factor of matching. By the optimal scale factor, pig ear root section can be found in visible image, and then the ear root central point can be confirmed. According to active shape model method, pig ear root central point was selected as the first feature point, the ear tip as 18th feature points, and both middle point of outlines as 9th and 26th feature points, and 34 pig ears outline feature points in all were selected by human-computer interaction. ASM search scope was defined in pig head region, thus pig ear outline could be extracted correctly. Then the extracted pig ear color was compared with the color of normal pig ears, the ear color detection accuracy could be above 77%, and it could be easily found whether there was the risk of blue ear pig disease. The results showed that due to the limited search scope method, the pig ear contour could be extracted accurately, and it could be applied to auto ear color detection in swine house.

Key words: pig; blue ear epidemic; scaling factor; ear contour; searching scope

引言

我国畜禽养殖中生猪养殖量居世界首位, 生猪存栏量占世界生猪存栏量的 50% 以上^[1]。猪肉产量占全国肉类产量比重不断增加, 到 2015 年已达到 65%, 其中城市消费者的生鲜猪肉消费量约占肉类消费总量的 60% 以上^[2]。由此可知生猪养殖业已成为畜禽养殖业的主导产业, 猪肉成为人们肉食品的主要来源。而生猪的健康问题直接关系到社会经

济利益和食品安全。猪繁殖与呼吸系统综合症 (PRRS, 蓝耳病), 是一种高致命性传染疾病, 首次发现于 20 世纪 80 年代末^[3-4]。我国于 2006 年大规模爆发蓝耳病, 造成了巨大的经济损失。蓝耳病主要以哺乳仔猪和怀孕母猪发病为主, 病猪出现高热、嗜睡、皮肤苍白、耳尖发紫、精神不振、行走不稳、食欲减退、咳嗽等特征。我国群养猪舍内疫情巡检几乎全是人工操作, 不能及时发现患病猪只^[5], 近年来, 很多学者针对生猪疫情检测开展了不同程度

的研究工作。MADSEN 等^[6]通过监测育肥猪每小时的饮水量,基于状态空间模型对生长猪的饮水模式进行建模,用于监测猪的饮水是否正常,预测猪疾病的爆发、饲料质量和通风设备问题等异常情况。陆明洲等^[7]利用 RFID 射频识别技术、红外探测技术和水流量传感器设计了一套群养方式下母猪饮水行为的自动监测系统,测得群养猪饮水频率。SILVA 等^[8-9]与 AERTS 等^[10]通过临床发现染病猪咳嗽持续时间及咳嗽频率高于健康猪,利用音频分析技术能够及时识别呼吸道感染病猪。肖德琴等^[11]为快速检测猪只运动信息,研究了一种基于视频追踪的猪只运动信息检测方法。朱伟兴等^[12]针对群养猪行为,开发了疑似病猪行为自动监测系统,监测具有异常行为的疑似病猪。刘波等^[13]为研究生猪体表温度与生猪异常的关系特征,提出了一种基于射线轮廓特征点匹配的红外与可见光图像自动配准方法。ANDERSEN 等^[14]利用耳标式温度传感器和摄像头研究猪耳部温度和行为的关系。HENTZEN 等^[15]在实验室内采用手术将无线胶囊温度传感器植入小猪体内,研究小猪体温和行为的关系。本文针对生猪蓝耳病疫情的耳部发病特征,采用图像匹配方法、主动形状模型方法提取白毛猪耳部轮廓图形,并将提取的图片进行颜色对比,判断其是否患有蓝耳病疫情。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验场地

选取白毛妊娠猪为研究对象,采用中国农机院机电技术应用研究所研制的热红外图像采集器和分辨率为 800 dpi 的普通相机同时采集生猪的热红外图像和可见光图像,于北京市农业机械研究所通州生猪养殖基地 5 号猪舍采集所需生猪图片。

1.2 试验方法

本试验分别采集 100 组睡卧姿态下妊娠猪图像,即热红外图像 100 幅,可见光图像 100 幅,采集时间为 13:00—15:00,光照充足。普通相机和热红外图像采集器并排安装在自动巡检消毒车的机械臂上,镜头方向保持一致,均安装在水平位置向下 30° 夹角处。热红外图像采集器和普通相机在采集图像时同时拍摄,尽量保证所拍摄照片中的生猪形态位置一致性。选取其中 50 对一致性较好的图像进行研究。由于生猪在图像中的头部姿态各不相同,所以其耳部形状也有所差异,在选择图像训练时,尽量选择耳部形状基本一致的图像进行分析。其中的 10 幅图像作为训练样本,并对普通相机所拍摄的 50 幅图像进行测试。

2 生猪热红外图像与可见光图像匹配方法

由于待配准图像采集方法不同,图像之间存在尺度、平移、旋转、视角和亮度等各种变换。分别用尺度因子、平移因子、旋转因子来衡量,在图像配准的过程中可确定最优的尺度因子、平移因子和旋转因子。本文所使用的生猪可见光图像和热红外图像为同一时间、同一视角采集,生猪的行为姿态大体一致,可以近似认为没有旋转和平移,即只需考虑尺度因子。计算图像间的最优尺度因子是图像能否正确匹配的关键因素。对于此类图像而言,设向量 $\mathbf{a} = (x, y)$ 为热红外图像中一个特征点,而向量 $\mathbf{b} = (x', y')$ 为可见光图像中与之对应的特征点,则尺度比的计算式为

$$k = \frac{s(\mathbf{a})}{s(\mathbf{b})} = (x_k, y_k) \quad (1)$$

式中 $s(\mathbf{a})$ ——特征点 a 的特征尺度

$s(\mathbf{b})$ ——特征点 b 的特征尺度

x_k ——尺度比 k 在 x 轴方向的坐标

y_k ——尺度比 k 在 y 轴方向的坐标

对于图像选取的 n 个特征点,其每个特征点的尺度比计算式为

$$k_i = \frac{s(\mathbf{a}_i)}{s(\mathbf{b}_i)} = (x_{ki}, y_{ki}) \quad (1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

2.1 生猪热红外图像轮廓特征点集的构建

生猪热红外图像如图 1 所示。从图中可以看出,由于生猪的体表热辐射率与周围环境存在较大差异,所以生猪轮廓能在图像中完整地表现出来,便于提取其外围轮廓。且生猪由于其耳根部体温较高,基本能代表生猪的正常体温,所以其耳根部区域与其他区域又存在明显差异,便于提取耳根部特征区域,用于后期提取生猪耳部图像进行研究分析。



图 1 白毛生猪热红外图像

Fig. 1 Infrared image of white pig

参考文献[16]将热红外图像采集器采集到的生猪图像进行处理,选取 HSV 颜色空间对图像进行变换,生成 S 层图像,采用改进的 Otsu 算法对 S 层图像进行二值化处理,对原图像进行耳根部特征区域检测,得到耳根部特征区域图像。本文采用该方

法提取其耳根部特征区域,并在原图像中进行标记。然后提取该耳根部特征区域图像寻找其区域中心点 C ,在原图像中一并进行标记,如图 2 所示。

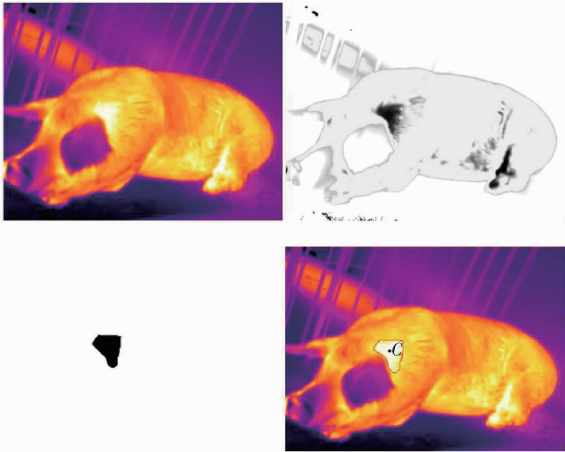


图 2 生猪耳部特征区域标记

Fig.2 Mark of ear root zone

通过 Otsu 自动阈值分割方法、滤波消噪等,对生猪热红外图像进行处理,提取出生猪外围轮廓的二值化图像(图 3)。对其轮廓构建特征点集。首先计算该生猪轮廓图像的中心点坐标为 $O = (x_o, y_o)$,将该点设为原点,建立二维坐标系。从 O 点出发构建辅助射线,射线与生猪轮廓的交点即为特征点(图 4),图 4 中 * 代表特征点。由于生猪轮廓较长,其背部和腹部到 O 点的距离比其头部和尾部到 O 点的距离要小得多,如果整个轮廓都按照间隔 θ 角度构建辅助射线的话,必然会导致头部和尾部的特征点间隔较大。鉴于这种情况,在 $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ 和 $225^\circ \leq \theta \leq 315^\circ$ 范围内时,间隔 θ 角构建辅助射线;而在其余角度范围内则间隔 θ/n 角构建辅助射线,



图 3 生猪热红外轮廓二值图像

Fig.3 Binary image of pig infrared contour

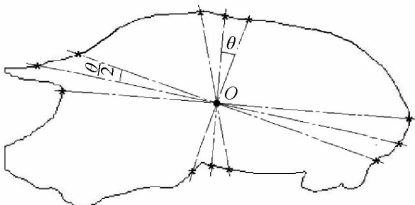


图 4 生猪热红外图像轮廓特征点提取

Fig.4 Feature points extraction for pig outline

根据生猪轮廓长短,选取 $n = 2$,共有 p 个轮廓线特征点。待配准红外图像的特征点集为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\} \quad (3)$$

2.2 生猪可见光图片轮廓特征点集构建

采集的生猪可见光图像如图 5 所示。采用 Canny 算子^[17]提取可见光图像的边缘轮廓(图 6)。经由尺度因子 (x_{ki}, y_{ki}) 变换后的中心坐标为 $O' = (x'_o, y'_o)$,按照 2.1 节所述方法构建辅助射线,提取生猪可见光图像轮廓特征点,构建可见光轮廓图像的特征点集

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_p\} \quad (4)$$



图 5 白毛生猪可见光图像

Fig.5 Visible light image of white pig



图 6 生猪可见光边缘轮廓图像

Fig.6 Outline of visible light image

2.3 改进的 Hausdorff 距离匹配

Hausdorff 距离(HD)是描述 2 个点集之间相似程度的一种度量,是集合与集合之间距离的一种定义形式,其值越小,点集之间匹配得越好。采用 Hausdorff 距离进行模板匹配,通常选取图像的边缘特征作为匹配依据。对于点集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_p\}$,Housdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (5)$$

其中
$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (6)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (7)$$

式中 $\| \cdot \|$ ——点集 A 和点集 B 间的距离范数
 $h(A, B)$ ——集合 A 到集合 B 的单向 Housdorff 距离

$h(B, A)$ ——集合 B 到集合 A 的单向 Hausdorff 距离

为了增强受外点干扰和形状缺损的鲁棒性, HUTTENLOCHER 等^[18] 提出部分 Hausdorff 距离 (Partial hausdorff distance, PHD), 其定义式为

$$H_{k,l}(A, B) = \max(h_k(A, B), h_l(B, A)) \quad (1 \leq k \leq p; 1 \leq l \leq q) \quad (8)$$

其中 $h_k(A, B) = k^{th}_{a \in A} \min_{b \in B} \| a - b \|$
 $h_l(B, A) = l^{th}_{b \in B} \min_{a \in A} \| b - a \|^l$

式中 $h_k(A, B)$ ——将 $\min_{b \in B} \| a - b \|^k$ 从小到大排序后, 取序号为 $\lfloor kp \rfloor$ 的值

$h_l(B, A)$ ——将 $\min_{a \in A} \| b - a \|^l$ 从小到大排序后, 取序号为 $\lfloor lq \rfloor$ 的值

由于多个图像变形也会产生相似的 $h(A, B)$ 值, 为获得更加准确的匹配结果, SIM 等^[19] 提出一种改进的 Hausdorff 距离 (LTS - HD), 即对部分 Hausdorff 距离求和再求平均, 具有较好的鲁棒性, 定义为

$$h_{LTS}(A, B) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \| a - b \|_{(i)} \quad (9)$$

其中, k 由 $h \times p$ 向下取整获得, $h \in [0, 1]$ 。

该方法剔除了由噪声干扰或遮挡而产生的大距离, 对于存在部分遮挡或受噪声干扰的图像可得到较好的匹配效果, h 一般取 0.8 ~ 0.9。

2.4 最优尺度因子提取

提取最优尺度因子 (x_k, y_k) 的算法如图 7 所示。

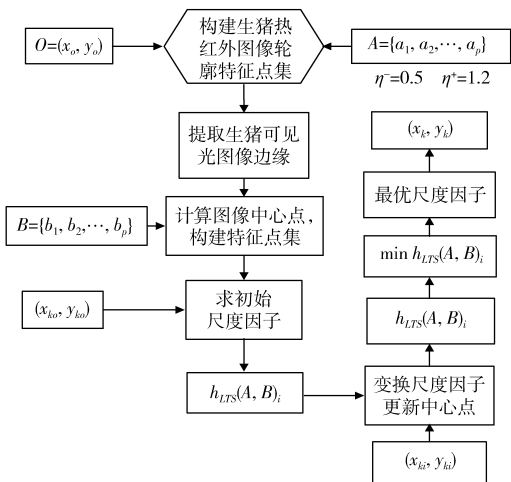


图7 匹配算法流程图

Fig.7 Flow chart of matching algorithm

利用提取的最优尺度因子 (x_k, y_k) , 计算可见光图像中生猪耳根部区域中心点 C' , 该点与之前计算的生猪热红外图像中耳根部区域中心点 C 相对应。

3 基于主动形状模型的生猪耳部轮廓提取方法

3.1 生猪耳部轮廓特征点的选取

目前常用的特征点标定方法是人工标定。为了减少人工标定对形状训练的主观影响, 结合上文已经得到的生猪耳根部区域中心点, 和生猪耳部轮廓生理结构的特点, 利用人机交互的方式制定通用的生猪耳部轮廓特征点选取规则。首先选取生猪的耳根部区域中心点, 并将其与耳尖轮廓点 (设为特征点 18) 相连, 与耳根部轮廓线相交点近似于耳根部轮廓线中点, 设为特征点 1; 由于生猪耳部两侧轮廓线从耳根部到耳尖部均有明显拐点, 选取过渡轮廓线近似中点分别标定为特征点 9 和特征点 26, 将 9 和 26 连接起来, 其连线与特征点 1 与特征点 18 连线的交点 J 近似于耳部轮廓的中心位置。以 J 点为圆心间隔 α 角作辅助线, 与生猪轮廓线的交点定义为特征点。与 1 点相隔 α 角开始记为特征点 2, 顺时针旋转标记直到 n (此处 $\alpha = 10^\circ, n = 34$)。在人工标记的特征点 9、18、26 附近, 若计算机生成的特征点与该人工标记特征点之间的角度 $\theta < 10^\circ$ 则该特征点忽略不计。生猪耳部轮廓特征点标记如图 8 所示。通过上述标记点的选取规则制定, 减少了随意标记特征点对形状对齐的影响。人工标定的 4 个特征点一定程度上保证了耳部轮廓的基本形状, 计算机标定其余特征点可保证耳部轮廓线的平滑完整, 从而使耳部区域识别较为方便。

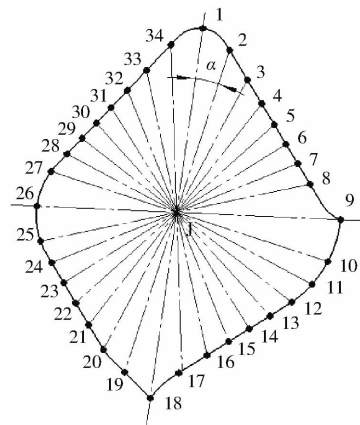


图8 耳部轮廓特征点选取

Fig.8 Feature points selection of pig ear

采用人工标定的 4 个特征点和计算机自动标定其余特征点集合, 形成训练集。通过对比试验, 确定要提取便捷特征点的个数, 由于特征点数越多, 匹配时间越长, 匹配准确率也越高; 但随着特征点的不断增加, 匹配率趋于平稳状态, 增加不明显。经综合考虑选取 34 为最佳匹配点数。

3.2 生猪耳部区域搜索范围确定

主动形状模型^[20-21]在进行目标识别检测时,首先要将获得的模型映射到待检测图像中,经过形状对齐操作后使平均形状与原图坐标空间脱离关系。由于在拍摄生猪可见光照片时,生猪在图像中的位置并非固定位置,这样很容易造成生猪耳部检测失败。因此,映射时要为平均形状设定一个适合的初始位置,即将每幅图像重新进行初始化,找到一个适合的初始化位置。

根据前文所提取的最优尺度因子,确定可见光图片生猪耳根部区域中心点坐标为 $C' = (x'_c, y'_c)$ 。以 C' 为中心点, R 为半径作圆, R 为生猪耳根部区域中心点 C' 到鼻尖处点 J 之间的距离(图9)。由图可知, R 为半径的搜索范围过大,因此,在进行主动形状模型提取生猪耳部轮廓时,将其搜索区域限定在以 O 点为圆心, $2R/3$ 为半径的圆周内。此处圆心 O 点在 $C'J$ 这条线段上, O 点到 C' 的距离为 $R/3$ 。这样降低了误检率,可以更好地实现对目标的分割检测。按照固定的搜索范围所提取的生猪耳部轮廓如图10所示。



图9 生猪耳部区域定位

Fig. 9 Searching scope of pig ear zone

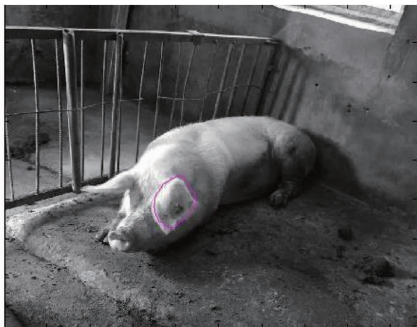


图10 生猪耳部轮廓提取

Fig. 10 Extraction of pig ear outline

4 生猪耳部颜色异常检测方法

由于健康生猪与患蓝耳病的生猪耳部颜色存在明显差别(图11),所以本文利用彩色图像中的颜色

特征检测生猪耳部颜色是否异常,来判定是否存在疑似蓝耳病病猪。具体的耳部颜色异常病猪自动检测方法如下:



图11 患蓝耳病疫情生猪耳部颜色

Fig. 11 Color of pig ear with blue ear epidemic

(1)分割耳部区域图像:采用图像匹配与主动形状模型相结合的方法,对采集到的可见光图像提取生猪耳部轮廓。

(2)对提取的耳部轮廓图像进行处理:将耳部RGB彩色图像转换为 $L^*a^*b^*$ 空间 b^* 分量的灰度图像,再利用自适应取阈值的 Otsu 法从 b^* 分量的灰度图像中分割出耳部患病所在区域,分割出的生猪患病区域的灰度 G_p 为 255,其余区域灰度 G_b 为 0。

(3)对提取的生猪耳部轮廓进行耳部像素标记训练。图12中,每个点代表图11中耳部位置像素点的RGB值,其中红色+代表生猪正常耳部像素点RGB值,蓝色*代表患蓝耳病的耳部像素点RGB值。根据分类结果计算出阈值,作为病猪判断标准。

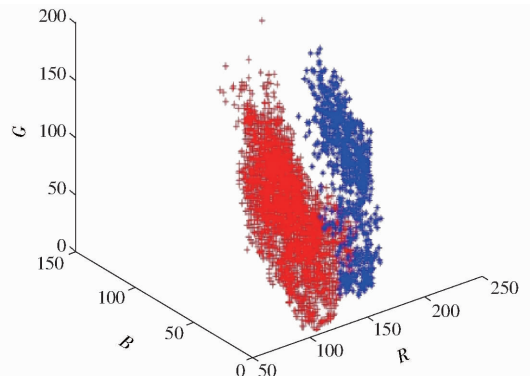


图12 生猪耳部像素标记

Fig. 12 Pixel labeling of different pig ear colors

(4)阈值训练:利用SVM分类器建立模型,每个像素点特征为一个输入数据,数据类型包括四维特征,分别为类别、 R 、 G 、 B ,其中正常耳部的类别为1,异常耳部的类别为-1, R 、 G 、 B 数据范围均为0~255。分类结果有2种,正常耳部像素点类型为1,病猪耳部像素点类型为-1。设定判断阈值为0.25。

(5)结果判定:在检测时,根据得到的分类器模

型,对每个生猪耳部的像素点进行计算。当耳部像素点计算得分多数在阈值之上,就认为这只猪是正常的,检测下一只猪,一个耳部超过1/2的像素点计算得分在阈值之下,就认为可能生病,定位此猪所在位置并报警。

5 试验结果

应用主动形状模型方法进行生猪可见光图像耳部轮廓检测。利用图像匹配方法提取最优尺度因子,将生猪耳部区域的搜索范围限定在特定区域内。试验在 Matlab 环境下由多分辨率主动形状模型工具箱编制。在训练集的基础上,扩大采集图像样本数量,图像采集器保持垂直位置不变,分别与生猪体长方向呈 30° 、 45° 和 60° 情况下获取图像,各取150组试验图片。将所获取的图像均采用文中所述方法进行生猪耳部颜色提取,结果见表1。检测结果表明,采用限定生猪耳部搜索区域的方法能够准确提取生猪耳部轮廓,对生猪耳部颜色检测准确率达到77%以上。由于生猪耳部图像受到光照及阴影的影响,且部分生猪耳部存在污渍,对生猪耳部颜色识别正确率产生了一定的干扰。从检测结果可看出,拍摄角度对生猪耳部

颜色识别有一定的影响。

表1 检测结果

Tab.1 Test results

拍摄 角度/ $(^\circ)$	耳部轮廓 检测/幅	耳部 匹配/幅	耳部颜色检测 正确率/%
30	143	142	81
45	145	143	85
60	132	131	77

6 结论

(1)利用图像匹配方法寻找生猪热红外图像和可见光图像的最优尺度因子,提取生猪热红外图像耳根部区域,将其映射到可见光图像。利用主动形状模型提取生猪耳部轮廓,人机交互选取34个耳部轮廓特征点,并将耳部轮廓搜索范围限定在生猪头部区域范围内。最后将提取的耳部轮廓颜色进行对比,检测该生猪是否患有蓝耳病疫情。对生猪耳部颜色检测准确率达到77%以上。

(2)将本文方法结合文献[16]所述非接触式生猪体温检测方法,应用于生猪非接触式蓝耳病疫情预警检测中,有利于及时发现生猪发热、耳部颜色异常等情况,可实现早期蓝耳病疫情的快速非接触式自动检测。

参 考 文 献

- 付蓉,张倩,于峰. 生猪养殖信息化现状及问题分析[J]. 河南农业科学,2014,43(12):169-172.
FU Rong, ZHANG Qian, YU Feng. Information technology direction and problem analysis of pig breeding[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2014,43(12):169-172. (in Chinese)
- 周振琪,顾莞婷,金融,等. 南京市消费者生鲜猪肉安全认知度与消费信心调查与分析[J]. 畜牧与兽医,2007,39(11):40-42.
- KEFFABER K K. Reproductive failure of unknown etiology[J]. Am Assoc Swine Pract Newslett, 1989,1:1-10.
- BIODEAU R, DEA S, SAUVAGEAU R A, et al. Porcine reproductive and respiratory syndrome in Quebec [J]. Veterinary Record,1991,129(5):102-103.
- 浦雪峰,朱伟兴,陆晨芳. 基于对称像素块识别的病猪行为监测系统[J]. 计算机工程,2009,35(21):250-252.
PU Xuefeng, ZHU Weixing, LU Chenfang. Sick pig behavior monitor system based on symmetrical pixel block recognition[J]. Computer Engineering,2009,35(21):250-252. (in Chinese)
- MADSEN T N, ANDERSEN S, KRISTENSEN A R. Modelling the drinking patterns of young pigs using a state space model[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005,48(1):39-61.
- 陆明洲,沈明霞,丁永前,等. 群养母猪饮水行为自动监测系统的设计[J]. 南京农业大学学报,2013,36(5):133-138.
LU Mingzhou, SHEN Mingxia, DING Yongqian, et al. Design of automatic system for drinking behavior monitoring in group housed sows[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2013,36(5):133-138. (in Chinese)
- SILVA M, FERRARI S, COSTA A, et al. Cough localization for the detection of respiratory diseases in pig houses[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2008,64(2):286-292.
- SILVA M, EXADAKTYLOS V, FERRARI S, et al. The influence of respiratory disease on the energy envelope dynamics of pig cough sounds[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009,69(1):80-85.
- AERTS J M, FERRARI S, SILVA M, et al. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009,64(2):318-325.
- 肖德琴,冯爱晶,杨秋妹,等. 基于视频追踪的猪只运动快速检测方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):351-357,331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=201045&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn/1000-1298.2016.10.045.
XIAO Deqin, FENG Aijing, YANG Qiumei, et al. Fast motion detection for pigs based on video tracking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(10):351-357,331. (in Chinese)
- 朱伟兴,浦雪峰,李新城,等. 基于行为监测的疑似病猪自动化识别系统[J]. 农业工程学报,2010,26(1):188-192.

- ZHU Weixing, PU Xuefeng, LI Xincheng, et al. Automatic identification system of pigs with suspected case based on behavior monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 188 - 192. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 ANDERSEN H M L, JORGENSEN E, DYBKJAR L, et al. The ear skin temperature as an indicator of the thermal comfort of pigs [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2008, 113(1): 43 - 56.
- 15 HENTZEN M, HOVDEN D, JANSEN M, et al. Design and validation of a wireless temperature measurement system for laboratory and farm animals[C]//Proceedings of Measuring Behavior, 2012: 466 - 471.
- 16 周丽萍,陈志,陈达,等. 基于改进 Otsu 算法的生猪热红外图像耳根特征区域检测[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4): 228 - 232,14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160430&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160430&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.030.
- ZHOU Liping, CHEN Zhi, CHEN Da, et al. Pig ear root detection based on adapted Otsu[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(4):228 - 232,14. (in Chinese)
- 17 CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, 8(6):679 - 698.
- 18 HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLIDGE W A. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,1993,15(9):850 - 863.
- 19 SIM D G, KWON O K, PARK R H. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 425 - 429.
- 20 COOTES F T, HILL A, TAYLOR J C, et al. The use of active shape models for locating structures in medical images[J]. Image and Vision Computing, 1994, 12(6): 355 - 366.
- 21 COOTES F T, TAYLOR J C, COOPER D, et al. Active shape models—their training and application[J]. Computer Vision Image Understanding, 1995, 61(1): 38 - 59.

~~~~~

(上接第 165 页)

- 12 郭浩,戈振扬,蒋海波,等. 基于体着色的植物构型三维重建和可视化模拟[J]. 农业工程学报, 2010,26(10): 195 - 200.  
GUO Hao, GE Zhenyang, JIANG Haibo, et al. Three dimensional reconstruction and visual modeling of plant architecture based on voxel coloring[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(10): 195 - 200. (in Chinese)
- 13 周薇,冯娟,刘刚,等. 苹果采摘机器人中的图像配准技术[J]. 农业工程学报, 2013,29(11): 20 - 26.  
ZHOU Wei, FENG Juan, LIU Gang, et al. Application of image registration technology in apple harvest robot[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(11): 20 - 26. (in Chinese)
- 14 FOIX S, ALENYA G, TORRAS C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9): 1917 - 1926.
- 15 FUCHS S M S. Calibration and registration for precise surface reconstruction with TOF cameras[J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2008, 5(3 - 4): 274 - 284.
- 16 何东健,邵小宁,王丹,等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(1): 331 - 336.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? file\\_no = 20160145&flag = 1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160145&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.045.  
HE Dongjian, SHAO Xiaoning, WANG Dan, et al. Denoising method of 3-D point cloud data of plants obtained by Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(1): 331 - 336. (in Chinese)
- 17 皮志明,汪增福. 基于深度图及支撑分析的图像分割[J]. 小型微型计算机系统, 2014,35(6): 1342 - 1347.  
PI Zhiming, WANG Zengfu. Image segmentation based on depth map and support analysis [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(6): 1342 - 1347. (in Chinese)
- 18 DASZYKOWSKI M, WALCZAK B, MASSART D L. Looking for natural patterns in data: part 1. density-based approach[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 56(2): 83 - 92.
- 19 DASZYKOWSKI M, WALCZAK B, MASSART D L. Looking for natural patterns in analytical data. 2. tracing local density with optics[J]. Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 2002, 42(3): 500 - 507.
- 20 周薇,刘刚,马晓丹,等. 不同生长时期果树多源图像的配准方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 177 - 183.  
ZHOU Wei, LIU Gang, MA Xiaodan, et al. Study on multi-image registration of apple tree at different growth stages[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 177 - 183. (in Chinese)
- 21 马晓丹. 苹果树冠层光照分布计算方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.  
MA Xiaodan. Calculation of light distribution to apple tree canopy [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)