

基于功率谱密度的蛋鸡声音检测方法^{*}

曹晏飞¹ 陈红茜^{1,2} 滕光辉¹ 赵淑梅¹ 李乔伟¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学网络中心, 北京 100083)

摘要: 利用声音连续监测动物生长过程的缺点是无效声音数据量大。为了获得便于研究人员使用的小数据量并同时反映动物行为信息的声音, 引入分类识别方法对原始声音进行处理。以栖架饲养环境中的含有海兰褐蛋鸡鸣叫声的声音片段和风机噪声片段为研究对象, 基于不同类型声音在 1 000 ~ 1 500 Hz 频率范围内的功率谱密度存在差异, 对 2 种声音片段进行了分类识别。试验结果表明, 该方法的全面正确识别率为 95%, 其中蛋鸡声音片段正确识别率为 93.3%。该方法将有助于实现风机噪声环境中动物声音实时检测与提取, 从而减少无用声音数据的储存与传输。

关键词: 蛋鸡 声音识别 功率谱密度 频率 风机

中图分类号: S815; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)02-0276-05

Detection of Laying Hens Vocalization Based on Power Spectral Density

Cao Yanfei¹ Chen Hongqian^{1,2} Teng Guanghui¹ Zhao Shumei¹ Li Qiaowei¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Network Center, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The purpose of this paper is to develop a method for automatically detecting vocalizations of laying hens from a large amount of original data. First, the original sound data were cut into 1 sec of length clips by using sound analysis software. Then, 130 clips including calls of Hy-Line Brown laying hens and 132 fan noise fragments were selected. Finally, an algorithm was developed for automatically identifying vocalization of laying hens and fan noise based on the discrepancies of 2 kinds of sounds' power spectral density in 1 000 ~ 1 500 Hz. The results showed that a 95% overall correct classification ratio was achieved and 93.3% of the vocalizations of laying hens were correctly identified. This approach can improve the efficiency during sound analysis and reduce the storage and transmission of useless sound.

Key words: Laying hens Sound recognition Power spectral density Frequency Fan

引言

近年来, 随着数字声音分析技术的发展, 将动物叫声翻译成人类熟悉的语义信息已变成了可能^[1]。目前, 国内外研究学者已经对水蛙^[2]、非洲象^[3]、黄腹山雀^[4]等野生动物以及猪^[5]、鸡^[6-7]、牛^[8]等家畜、家禽的声音信号进行了数字化分析研究。

动物声音包含大量的情绪信息, 如动物在行为受阻时或伤痛时会发出明显的尖叫声^[9-11], 因

此, 动物声音可用来反馈动物生理变化以及外部环境的变化。与传统生理指标检测相比, 这种声音检测方法还具有无应激、无接触以及连续采集的优点, 所以研究人员往往通过检测畜禽的叫声来评价环境舒适性^[12]以及改善畜禽福利^[13-15]。

为了获取畜禽特定发声, 研究人员在实验室条件下人为刺激动物发声, 如药物诱导发声^[16]或应激发声^[17]等。然而生产环境中还有除动物声音之外的背景噪声, 尽管已有研究人员能够利用不同去噪

收稿日期: 2014-01-27 修回日期: 2014-03-03

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD08B05) 和国家现代农业(蛋鸡)产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-41)

作者简介: 曹晏飞, 博士生, 主要从事农业环境控制与信息技术研究, E-mail: bmxzbx@126.com

通讯作者: 滕光辉, 教授, 博士生导师, 主要从事设施环境检测与信息技术研究, E-mail: futong@cau.edu.cn

方法来去除动物声音中的背景噪声^[18-19],但是由于动物发声在时间上存在着不确定性和随机性,因此用于分析的动物声音均是由人工从大量的声音数据中统计提取^[20],这种提取方法需要耗费大量的人力和物力^[21]。

现代规模化畜禽舍中,生产设备所产生的噪声往往会干扰动物声音检测,因此一个基本问题是区分声音数据中的设备噪声和包含设备噪声的畜禽声音。由于这2类音频数据在时域或频域上存在着特征差异,因此可根据这种差异来识别出不同的声音类型,基于功率谱密度的频域分析方法已获得了不少研究人员的青睐^[22-24]。

本文将采集到的声音数据成长度相等的声音片段,以家禽舍中常见的风机噪声片段和含有风机噪声的蛋鸡声音片段为研究对象,利用不同类型声音片段在功率谱密度上的差异,以期得到一种能够快速识别风机噪声片段和蛋鸡声音片段的算法。

1 基于功率谱密度的声音片段识别方法

在噪声环境中,由于动物发声到拾音器之间的距离是可变的,因此利用声音信号幅度来区分风机噪声和蛋鸡声音显然是不可行的。功率谱密度(Power spectral density, PSD)可用来反映信号能量特征随频率的变化关系,声音识别过程可以以此为基础来辨别不同类型的音频数据,具体识别流程图1所示。

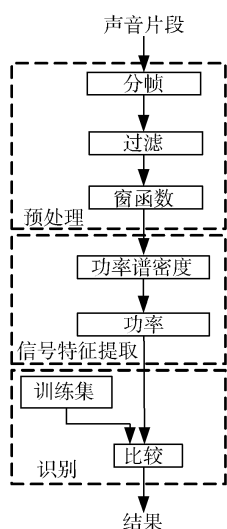


图1 识别过程流程图

Fig. 1 Flow chart of identification procedure

基于功率谱密度的声音片段识别方法包括3个步骤:①对声音片段进行分帧、过滤以及加窗等预处理。②对所有经过预处理的帧声音信号 $s(k)$ 进行离散傅里叶变换,计算得到相应的功率谱密度PSD和功率 W 。③从计算得到的所有帧功率中提

取出最大值 W_{\max} ,将其与训练集中设定的功率阈值 δ 进行比较,从而判别出声音片段的类型。

1.1 预处理

动物发声是十分复杂的非平稳信号,不过一般认为在10~30 ms内声音信号特性基本不变或者变化缓慢^[25],因此可以设置一帧声音信号的长度为10~30 ms,然后对每一帧声音信号进行过滤和加窗处理。

为了减少边缘效应和频谱泄漏,信号处理的通常做法是将声音信号通过帧长为 N 的汉明窗(Hamming)进行分帧。汉明窗函数 $\omega(n)$ 的表达式为^[25]

$$\omega(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/(N-1)) & (0 \leq n \leq N-1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 N ——单位帧的采样数

1.2 信号特征提取

功率谱密度可以反映声音信号的频率特征,利用离散傅里叶变换(Discrete Fourier transform, DFT)来计算声音信号的功率谱密度。

假设第 m 帧声音信号为 $s(k)$, $k=0, 1, \dots, N-1$,采样频率为 f_s ,则 N 点信号的离散傅里叶变换 S_n 定义为^[25]

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (2)$$

式中 j ——虚数单位

第 m 帧声音信号在不同频率范围内的功率 W_m 定义为

$$W_m = \sum_{f=f_s}^{f_e} P_i f_r \quad (3)$$

式中 f_s ——起始频率,Hz

f_e ——结束频率,Hz

P_i ——频率 i 处的功率谱密度, N^2/Hz

f_r ——频率分辨率,Hz

1.3 有效帧提取算法

为了提高算法的性能,只有功率较高的帧(即有效帧)声音信号才被选择用来定义功率阈值,具体提取算法流程(图2)如下:①将声音片段分成 M 帧声音信号,利用式(2)、(3)计算出第 m 帧声音信号对应的功率谱密度和功率 W_m 。②提取出计算得到的所有帧声音信号功率 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_M\}$ 中的最大值 W_{\max} 。③获取声音片段中的第1帧声音信号功率 W_1 ,将其与最大功率 W_{\max} 的60%进行比较,若大于最大功率 W_{\max} 的60%,则该帧为有效帧,

将其保存;若小于最大功率 W_{\max} 的 60%,即为普通帧,将其删除并获取下一帧声音信号功率 W_2 ,将其与最大功率 W_{\max} 的 60% 进行比较,以此类推,直至整个声音片段全部处理完成。

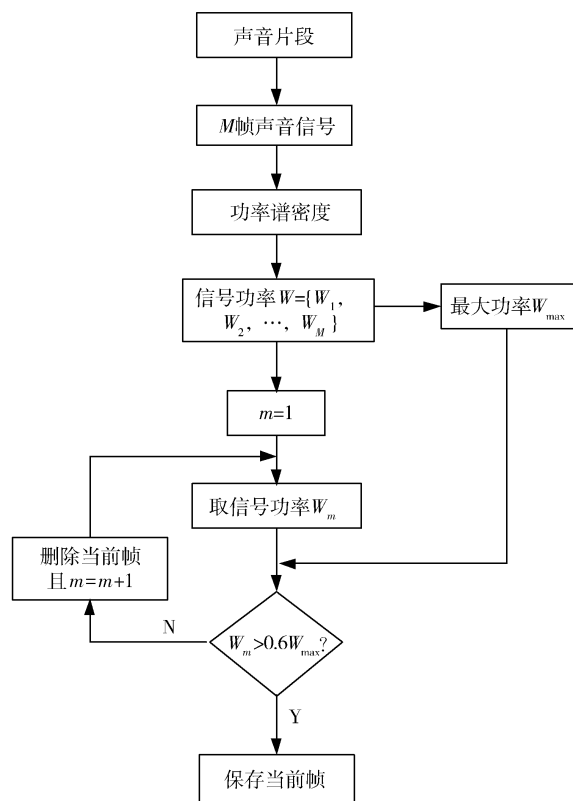


图2 有效帧提取流程图

Fig. 2 Flow chart of valid frame extraction

1.4 训练集阈值提取及声音片段识别

根据上述 1.3 节算法,分别提取出蛋鸡声音信号和风机噪声信号在整个频率范围内的有效信号帧,比较二者相对应的功率谱密度,挑选出能够区分风机噪声与蛋鸡声音的频率范围 ω ,进而在此频率范围 ω 内按照 1.3 节算法挑选出代表风机噪声和蛋鸡声音的有效帧,以此作为训练集。

分别统计出训练集中蛋鸡声音和风机噪声相对应的功率最大值、平均值和最小值,从而设定能够区分蛋鸡声音片段与风机噪声片段的功率阈值 δ 。

按照式(2)、(3),计算出未知声音片段在频率范围 ω 内的帧声音信号功率 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_M\}$,挑选出其中的最大功率 W_{\max} ,将其与功率阈值 δ 比较,若 $W_{\max} \geq \delta$,则该帧是蛋鸡声音帧,即声音片段中包含有蛋鸡声音帧,该声音片段为蛋鸡声音片段,否则该声音片段为风机噪声片段。

2 试验

2.1 声音数据

声音数据采集试验在北京市海淀区中国农业大学上庄实验站 3 号栖架饲养舍中开展,栖架养殖试

验平台大小为 4 500 mm × 1 500 mm × 2 900 mm (长 × 宽 × 高),包括栖架、栖杆、饮水线、产蛋箱、集蛋线以及食槽等,舍内配备有一台变频通风设备,共饲养了 102 只同一批次的海兰褐蛋鸡^[26]。声音采集于 2012 年 9 月—2012 年 10 月,此阶段蛋鸡生长周龄为 55 ~ 59 周。

音频信息采集平台选用工业级控制器(美国国家仪器有限公司,型号 NI PXI-1050),声音采集卡为 NI 4472B(美国国家仪器有限公司,8 通道同步采集、24 位分辨率、同步采样率可达 102.4 kS/s),声音传感器为 MPA201(北京声望声电技术有限公司,响应频率为 20 Hz ~ 20 kHz,灵敏度为 50 mV/Pa),录音软件为 NI Sound and Vibration Assistant 2010(美国国家仪器有限公司),采样频率为 32 kHz,采样精度为 16 位,单声道采集,考虑到后期软件分析处理的需要,音频连续采集以 5 min 声音数据为一个存储单元,2 个数据单元间隔 1 min,数据以 *.tdms 文件存储于现场服务器。

利用 LabView 软件编制的转换程序,将存储的二进制文件 *.tdms 生成 *.wav 格式波形文件。选用音频处理软件 Adobe Audition 1.0(美国阿都比系统公司)回放,将采集到的声音数据切分为长度 1 s 的声音片段。

鸣叫声、鸣唱声和产蛋发声是蛋鸡的 3 种典型声音,风机噪声片段和这 3 种典型蛋鸡声音片段的时间信号如图 3 所示。显然,蛋鸡鸣唱声和产蛋发声的幅度值要明显大于风机噪声,而蛋鸡鸣叫声和风机噪声的幅度值相差不大,这说明只要算法能够区分风机噪声和蛋鸡鸣叫声,那么该算法也可以区分风机噪声与另外 2 种典型蛋鸡声音,因此选择风机噪声片段和蛋鸡鸣叫声片段来训练和测试识别算法。

从切分的声音片段中挑选出 132 个风机噪声声音片段和 130 个含风机噪声的蛋鸡鸣叫声声音片段(简称蛋鸡声音),然后再导入 LabView 软件编制的声音识别程序中进行分析与识别。

2.2 声音分析

从挑选出的声音片段中随机选取 10 个蛋鸡声音片段和 10 个风机噪声片段来进行处理。以长度为 20 ms 的声音信号为一帧,并伴有 50% 的重叠部分。

考虑到蛋鸡声音频率范围主要是在 2 500 Hz 以内^[19],同时为了避免拾音器设备的电流干扰,本文应用截止频率范围为 100 ~ 2 500 Hz 的巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器对声音信号进行过滤。

按照 1.3 节中提供的有效帧提取流程,在频率

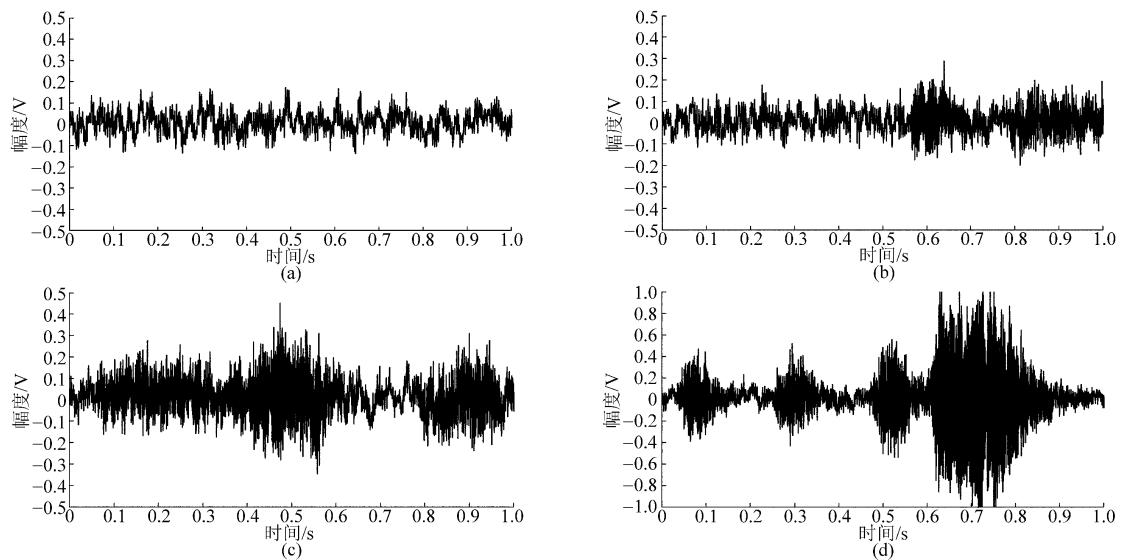


图 3 不同声音片段的时间信号

Fig. 3 Time-signal of different kinds of sound clips

(a) 风机噪声 (b) 蛋鸡鸣叫声 (c) 蛋鸡鸣唱声 (d) 蛋鸡产蛋发声

范围 100 ~ 2 500 Hz 内 ,最终从 20 个声音片段中得到了 82 帧蛋鸡声音和 87 帧风机噪声 ,分别计算这 2 类声音信号帧的功率谱密度平均值 ,如图 4 所示。显然 ,在 1 000 ~ 1 500 Hz 频率范围内 ,蛋鸡声音与风机噪声的功率谱密度存在显著性差异 ,这说明在此频率范围内 ,基于功率谱密度来区分蛋鸡声音和风机噪声是可行的。

根据 1.3 节方法 ,在 1 000 ~ 1 500 Hz 频率范围内 ,从上述 10 个蛋鸡声音片段和 10 风机噪声片段得到了 38 帧蛋鸡声音和 59 帧风机噪声 ,同时计算出相应的功率。统计 2 种类型声音在 100 ~ 2 500 Hz 和 1 000 ~ 1 500 Hz 2 个频率段内的功率最大值、平均值和最小值 ,如表 1 所示。在频率 100 ~ 2 500 Hz 范围内 ,风机噪声功率的最大值大于蛋鸡声音功率的平均值 ,显然无法定义阈值来区分不同类型声音信

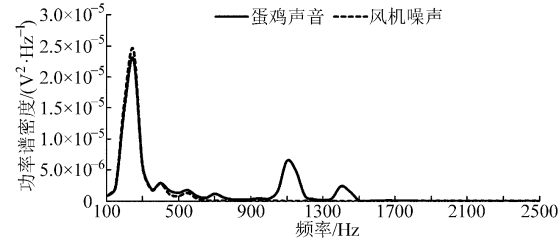


图 4 蛋鸡声音和风机噪声的功率谱密度

Fig. 4 PSD of laying hens' vocalization and fan noise

号。在 1 000 ~ 1 500 Hz 频率段内 ,风机噪声功率的最大值明显小于蛋鸡声功率最小值 ,因此可以定义功率阈值 δ 。人工设置阈值 δ 为 $1.100 \times 10^{-4} \text{ V}^2$,即如果声音片段在 1 000 ~ 1 500 Hz 频率段内的最大功率 W_{\max} 大于 $1.100 \times 10^{-4} \text{ V}^2$,则认为该声音片段中包含有蛋鸡声音帧 ,此声音片段为蛋鸡声音片段 ,反之为风机噪声片段。

表 1 不同声音在不同频率段内的帧功率

Tab. 1 Frame power of different sounds in different frequency bands

频率段 /Hz	蛋鸡声音 /V ²			风机噪声 /V ²			阈值 /V ²
	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	
100 ~ 2 500	6.739×10^{-3}	3.950×10^{-3}	2.696×10^{-3}	4.866×10^{-3}	2.625×10^{-3}	1.655×10^{-3}	—
1 000 ~ 1 500	4.964×10^{-3}	1.623×10^{-3}	1.990×10^{-4}	7.800×10^{-5}	2.700×10^{-5}	1.500×10^{-5}	1.100×10^{-4}

2.3 结果与讨论

利用基于功率谱密度的蛋鸡声音识别算法处理剩余的 242 个声音片段(120 个蛋鸡声音片段和 122 个风机噪声片段) ,并将识别结果与人工识别进行比较 ,结果如表 2 所示。

显然 ,该算法的全面正确识别率为 95% ,其中蛋鸡声音的正确识别率为 93.3% (蛋鸡声音误判为风机噪声的比例为 6.7%) ;风机噪声的正确识别率

为 96.7% (风机噪声误判为蛋鸡声音的比率为 3.3%) 。

表 2 基于功率谱密度算法的识别结果

Tab. 2 Result of recognition based on PSD algorithm

类别	总数量	正确识别数量	正确识别率 /%
蛋鸡声音	120	112	93.3
风机噪声	122	118	96.7

显然蛋鸡声音的误判率可达 6.7% ,这是因为

蛋鸡鸣叫声多为蛋鸡走动、采食等行为同步发出的短促简单叫声,声音强度较弱。同时蛋鸡声音距拾音器的可变距离和方位也是影响蛋鸡声音误判率的一个重要因素。

从大量声音数据中自动检测出蛋鸡声音的方法是十分必要的。与人工提取出动物声音方法^[20]相比,本研究的蛋鸡声音自动检测方法将会使人们更容易找到蛋鸡发声的位置,从而提高工作效率。然而需要指出的是,本研究的方法也只是帮助人们从大量声音数据中提取出含有蛋鸡声音的声音片段,至于蛋鸡声音的开始位置,结束位置以及声音类型仍然需要人工来进行标记。

尽管本研究的试验结果是在小规模家禽的实验室条件下获取的,但是仍然足以评估该方法的性能

和鲁棒性。只不过在现场条件下,应用该方法可能会存在影响算法准确性的问题。如设备类型和数量增加,并且各种设备还可能会同时运转等,这些都需要进一步深入调查研究。

另外,尽管本研究中算法是以单个声音片段为对象进行测试,但是它能够以连续记录和实时的方式在现场条件下应用。

3 结束语

提出了一种从大量声音数据中自动检测出蛋鸡声音的方法,该方法根据蛋鸡声音与风机噪声的功率谱密度差异,从而确定了可以识别出蛋鸡声音片段的功率阈值。最终蛋鸡声音片段的正确识别率可达93.3%。

参 考 文 献

- 1 Manteuffel G, Puppe B, Peter C S. Vocalization of farm animals as a measure of welfare[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2004, 88(1-2): 163-182.
- 2 Wyherley J, Doran S, Beebe T J C. Male advertisement call characters as phylogeographical indicators in European water frogs[J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2002, 77(3): 355-365.
- 3 Soltis J, Leong K, Savage A. African elephant vocal communication II: rumble variation reflects the individual identity and emotional state of callers[J]. *Animal Behaviour*, 2005, 70(3): 589-599.
- 4 肖华,周智鑫,王宁,等.黄腹山雀的鸣唱特征分析[J].*动物学研究*, 2008, 29(3): 277-284.
Xiao Hua, Zhou Zhixin, Wang Ning, et al. Analyzing song characteristics of yellow-bellied tits (*Parus venustulus*) [J]. *Zoological Research*, 2008, 29(3): 277-284. (in Chinese)
- 5 Sara F, Mitchell S, Marcella G, et al. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(2): 318-325.
- 6 Marx G, Leppelt J, Ellendorff F. Vocalization in chicks (*Gallus gallus Dom*) during stepwise social isolation[J]. *Applied Animal Behavior Science*, 2001, 75(1): 61-74.
- 7 余礼根,滕光辉,李保明,等.蛋鸡发声音频数据库的构建与应用[J].*农业工程学报*, 2012, 28(24): 150-156.
Yu Ligen, Teng Guanghui, Li Baoming, et al. Development and application of audio database for laying hens[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(24): 150-156. (in Chinese)
- 8 Watts J M, Joseph M S. Vocal behavior in cattle: the animal's commentary on its biological processes and welfare[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2000, 67(1): 15-33.
- 9 Zimmerman P H, Koene P, Hoof J A. Thwarting of behavior in different contexts and the gavels-call in the laying hen[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2000, 69(4): 255-264.
- 10 Daniel M W, Leah A B, David F. Vocal response to pain in piglets[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1998, 56(2): 161-172.
- 11 Thomas T J, Weary D M, Appleby M C. Newborn and 5-week-old calves vocalize in response to milk deprivation[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2001, 74(3): 165-173.
- 12 Daniella Jorge de Moura, Irenilza de Alencar Naas, Elaine Cangussu de Souza Alves, et al. Noise analysis to evaluate chick thermal comfort[J]. *Scientia Agricola*, 2008, 64(4): 438-443.
- 13 顾宪红,胡华伟,张俊辉.利用模拟母猪的抚慰声音减缓仔猪断奶应激的方法:中国,201110161027.5[P]. 2011-11-23.
- 14 Jeremy N M, Ruth M M, Weary D M. Responses of dairy cows and calves to each other's vocalizations after early separation[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2002, 78(1): 19-28.
- 15 Allison A T, Daniel M W, Martin L, et al. Behavioural responses of piglets to castration: the effect of piglet age[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2001, 73(1): 35-43.
- 16 Hirtum A V, Berckmans D. Fuzzy approach for improved recognition of citric acid induced piglet coughing from continuous registration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(3): 677-686.
- 17 李志忠,滕光辉.子带特征参数在家禽应激发声识别中的应用[J].*农业机械学报*, 2009, 40(3): 143-147.
Li Zhizhong, Teng Guanghui. Application of subband feature of poultry vocalization for identifying their status[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 143-147. (in Chinese)

(下转第300页)

- 6 朱从民, 黄玉美, 马斌良, 等. 惯性导航自动引导车磁钉校正路径迭代学习方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 40-44.
Zhu Congmin, Huang Yumei, Ma Binliang, et al. Path iterative learning of inertial guided AGV with magnets correction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 40-44. (in Chinese)
- 7 Yang Bin, Taehyun Shim. Constrained model predictive control for backing-up tractor-trailer system [C]//Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012: 2165-2170.
- 8 Jaeil Roh, Hyunsuk Lee, Woojin Chung. Control of a car with a trailer using a driver assistance system [C]//Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011: 2890-2895.
- 9 陈无畏, 施文武, 王启瑞, 等. 基于动力学模型的自动导引车智能导航控制研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 90-93.
Chen Wuwei, Shi Wenwu, Wang Qirui, et al. Intelligent navigation and control method based on dynamic model of an automatic guided vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 90-93. (in Chinese)
- 10 Shi Enxiu, Guo Junjie. Simulation and kinematics analysis of composite turning for the omni-direction AGV [C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008: 2770-2775.
- 11 赵磊, 王鸿鹏, 董良, 等. 一种基于动力学模型的高速轮式移动机器人漂移运动控制方法[J]. 机器人, 2014, 36(2): 137-146.
- 12 宋永端, 李丹勇, 蔡文川. 移动机器人及其自主化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 252-254.
- 13 Abdullah A S, Hai L K, Osman N A, et al. Vision based automatic steering control using a PID controller [J]. Jurnal Teknologi, 2006, 44(A): 97-114.
- 14 王良曦, 王红岩. 车辆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 87-104.
- 15 Wang Chaoli. Semiglobal practical stabilization of nonholonomic wheeled mobile robots with saturated inputs [J]. Automatica, 2008, 28(3): 816-822.
- 16 Chang W J, Huang W H, Chang W, et al. Robust fuzzy control for continuous perturbed time-delay affine takagi-sugeno fuzzy models [J]. Asian Journal of Control, 2011, 13(6): 818-830.
- 17 廖华丽, 周祥, 董丰, 等. 基于模糊控制的 AGV 寻迹算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(7): 896-898.
Liao Huali, Zhou Xiang, Dong Feng, et al. AGV navigation algorithm based on fuzzy control [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(7): 896-898. (in Chinese)
- 18 Doudou S, Khader F. Direct adaptive fuzzy control of a class MIMO non-affine nonlinear systems [J]. International Journal of Systems Science, 2012, 43(6): 1029-1038.
- 19 Dax T, Kar I N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(3): 501-510.
- 20 陈平, 倪振, 马伟. 四轮差动全方位移动机器人路径跟随控制分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(3): 20-24.
Chen Ping, Ni Zhen, Ma Wei. The path following control analysis for 4-wheel differential omnidirectional mobile robot [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(3): 20-24. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 280 页)

- 18 Hirtum A V, Berckmans D. Considering the influence of artificial environmental noise to study cough time-frequency features [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 667-675.
- 19 曹晏飞, 滕光辉, 余礼根, 等. 含风机噪声的蛋鸡声音信号去噪方法比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 212-218.  
Cao Yanfei, Teng Guanghui, Yu Ligen, et al. Comparison of different de-noising methods in vocalization environment of laying hens including fan noise [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 212-218. (in Chinese)
- 20 韦力, 邵伟伟, 林植华. 饰纹姬蛙求偶鸣声特征分析[J]. 动物学研究, 2013, 34(1): 14-20.  
Wei Li, Shao Weiwei, Lin Zhihua. Characteristics of courtship calls of *Microhyla ornata* (Anura: Microhylidae) [J]. Zoological Research, 2013, 34(1): 14-20. (in Chinese)
- 21 Berckmans D. Basic principles of PLF: gold standard, labeling and field data [C]//The 6th European Conference on Precision Livestock Farming, 2013.
- 22 Lagarde J P, Mallekh R. Feeding sounds of turbot (*Scophthalmus maximus*) and their potential use in the control of food supply in aquaculture: I. Spectrum analysis of the feeding sounds [J]. Aquaculture, 2000, 189(3-4): 251-258.
- 23 Mallekh R, Lagarde J P, Eneau J P, et al. An acoustic detector of turbot feeding activity [J]. Aquaculture, 2003, 221(1-4): 481-489.
- 24 Exadaktylos V, Silva M, Aerts J M, et al. Real-time recognition of sick pig cough sounds [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 207-214.
- 25 赵力. 语音信号处理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 32-45.
- 26 杜燕. 新型栖架系统中饲养密度及产蛋箱配置对蛋鸡生产的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.  
Du Yan. Influence of different stocking density and laying nest boxes configuration on performance of new perch housing [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)