

中华人民共和国教育部 主管
上海交通大学 主办

CN 31-1707/T
ISSN 1006-7167
CODEN: SYYTaz

实验室研究与探索

Research and Exploration in Laboratory



全国高校实验室工作研究会会刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊
RCCSE中国权威学术期刊

2020/3

第39卷 第3期
Vol. 39 No. 3

总第289期 (月刊)
Serial No. 289 (Monthly)

ISSN 1006-7167



03>

9 771006 716202



实验室研究与探索 (月刊)

SHIYANSHI YANJIU YU TANSUO

第39卷第3期总第289期

1982年创刊

2020年3月出版

期刊基本参数:CN31-1707/T*1982*m*A4*292*zh*P*23.50*7150*66*2020-03

目次

· 实验技术 ·

基于协方差矩阵重构的稳健波束形成算法	郭业才,陈晨,胡国乐	1
深埋隧洞岩爆微震监测预警技术	马天辉,刘飞,唐春安	6
水辅助制备稳定的 CsPbBr ₃ @SiO ₂ 纳米粒子	杨晓玲,徐腾警,侯璐,等	11
柔性机器人动力学跟踪变阻抗控制	张刚,布挺,焦文潭,等	15
考虑温度影响的硅钢片磁致伸缩测试实验	刘行谋,吴佳馨,王伟,等	20
改进的惯性运动传感器步态识别	徐狄涛,姜斌,包建荣,等	25
碳酸盐岩酸化压裂力学性质劣化效应试验	张鲲鹏,陈勉,戴一凡,等	30
玻璃钢复合材料板材 Lamb 波传播特性分析	齐添添,陈尧,何才厚,等	35
一种数字图像相关非均匀位移精度优化方法	白鹏翔,雷冬,朱飞鹏	40
稀土掺杂 NaGd(WO ₄) ₂ 反蛋白石光子晶体的制备及其发光性能	屈重年,刘旭焱,李果,等	45
一种纯 CMOS 低功耗高电源抑制电压基准电路	于建海,尹亮	50
FCM 改进方法在图像分割中的知识发现	汪克峰,钱进,李仁璞	55
独立光储直流微网母线电压分层协调控制策略	康家玉,白一镨,王素娥,等	62
群机器人目标围捕系统设计与性能测试	朱建军,李冰,张亚超	67
机器人柔性变形误差模型建模	付婷,魏端丽	72
飞机结构强度试验安装顺序的遗传算法优化	张洋洋,于哲峰	78

· 仪器设备研制与开发 ·

转杯纺快速成条仪的设计	张玉泽,林惠婷,汪军	84
最大功率点跟踪的太阳能光伏发电系统实验平台设计	刘洋,杜玉晓,蔡梦婷,等	88
基于 USRP 的 AIS 接收机实现	郭志恒,曾柏华,洪金城,等	93
无能耗错叠式非机动车停车装置仿真与模型设计	沈孟锋,何剑敏,羊荣金,等	98

· 专题研讨——虚拟仿真实验(79) ·

三相三线制 Vienna 整流器系统仿真与实验平台设计	冯兴田,崔晓,陶媛媛	102
具有势场启发因子的蚁群路径规划仿真	王辉,于立君,胡羽坤,等	106
基于 Unity 3D 反恐排爆机器人虚拟仿真设计	杨鑫科,吴娟,徐浩,等	110
直线电动机推力测试虚拟仿真实验设计	于立娟,张学成,陈晓波,等	115
基于 Unity 3D 的机电产品虚拟拆装实验系统	丁毓峰,徐鑫,闵新晋,等	118
基于 PCS7 的过程仿真及控制实验设计	向欣,王卓,禹万泓	123

· 计算机技术应用 ·

动态主机配置协议分析及其在模拟器中的实验设计与仿真	李勇,范全润,张顺吉,等	128
基于 Proteus 的 80X86 外部中断电路的设计与仿真	王超,符晓玲,李斌	132

· 实验教学示范中心建设 ·

引入前沿与应用 培养创新能力	肖琳,蒋丽娟,王晓琳,等	138
计算机实验教学系统建设与管理方案研究	路遥,范雪松,崔建	142

· 实验教学与创新 ·

基于四轴运动控制教学平台的多元实践体系改革	史莹晶,李瑞,梁颖	146
氧化石墨烯/聚丙烯腈纤维膜油水分离性能的研究型综合实验设计	祝磊,尹莹莹,李潇,等	151
建筑材料实验教学三位一体模式探索	李福海,何肖云峰,李瑞,等	155
比较法在精馏实验教学中的应用	阳超琴,张权,顾丽莉,等	160
虚实结合的教学模式在燃烧学实验中的应用	曾令艳,王海明,黄怡珉,等	163
声控延时综合实验设计与实践	王燕杰,吴霞,贾生尧	168
WSR 方法论在食品化学课程建设中的实践	陈海华	173
枳壳类中药材干燥果实 DNA 提取方法的优化实验设计	李明娟,黄耀,金莉,等	178
基于 PP 中空板实地营建的低龄趣味空间探索与实践	王迪,严湘琦,江孟滢,等	182
“校园 APP 健身跑”融入大学生体育课的实验教学模式探究	黄文胜	186
基于多体动力学模型的汽车操稳性和平顺性虚拟教学实验	靳畅,周毅,万晓,等	190
铁含量测定的研究型教学实验设计与实践	王益林,文辉忠,舒馨,等	194
水处理生物学创新实验——领略微生物之美	谢依侨,孟佩佩,李祎	198
PAD-FC 教学模式在中药化学实验中的探索与应用	朱立俏,盛华刚,周洪雷	203
生活化学实验知识竞赛教学环节的探索	刘淑珍,陈永宝,管学红,等	208
电动机拖动虚拟实验设计及在教学中的应用	全文,陈曦,韩洪洪	211

改进的惯性运动传感器步态识别

徐狄涛¹, 姜斌¹, 包建荣¹, 刘超¹, 朱芳¹, 何剑海²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院 杭州 310018;

2. 宁波职业技术学院 电子信息工程学院 浙江 宁波 315800)

摘要: 针对现有步态识别研究中步态识别率低、算法单一等问题,提出了一种基于惯性运动传感器的步态识别方法。首先,该方法结合动态时间规整与人工神经网络,通过前者提取固定长度的步态特征,并设置成本函数的阈值来判别后者的正负输入,提取得到波形特征。其次,运用列文伯格-马夸尔特算法改进标准BP神经网络,最终完成步态识别。实验证明所提的改进步态识别方法将平均步态识别率和相等错误率维持在91.5%和9.1%,较好地提高了步态识别的准确率。因此,该方法可作为高级认证方法的补充,以增加个人信息的隐私和安全性,适合实验室仪器安全管理应用。

关键词: 步态识别; 传感器; 动态时间规整; 神经网络

中图分类号: TP 391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-7167(2020)03-0025-05



Modified Gait Recognition Method Based on Inertial Motion Sensor

XU Ditao¹, JIANG Bin¹, BAO Jianrong¹, LIU Chao¹, ZHU Fang¹, HE Jianhai²

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, Zhejiang, China)

Abstract: To solve the problems of low gait recognition rate and single algorithm in current gait recognition research, a gait recognition method based on inertial motion sensor is proposed. First, this method combines dynamic time warping with artificial neural network, extracts fixed-length gait features by the former and sets the threshold value of cost function to discriminate the positive and negative inputs of the latter, and extracts the waveform features. Second, the Levenberg-Marquardt algorithm is used to improve the standard BP neural network. Finally, the gait recognition is completed. Experimental results show that the improved gait recognition method maintains the average gait recognition rate and the equal error rate at 91.5% and 9.1%, which improves the accuracy of gait recognition. Therefore, the proposed method can be used as a supplement to the high-level authentication method to increase the privacy and security of personal information. And it is also very suitable to the application in the secure management of the apparatus in laboratory.

Key words: gait recognition; sensor; dynamic time warping; neural network

收稿日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1809201); 浙江省公益技术研究计划项目(LGG18F010011, LGG19F010004); 浙江省2016年度高等教育教学改革项目(jg20160237); 浙江省高等教育“十三五”第一批教学改革研究项目(jg20180471)

作者简介: 徐狄涛(1994-),男,浙江嘉兴人,硕士生,研究方向为生物步态识别。Tel.: 17816123801; E-mail: xuditaoen@163.com

通信作者: 姜斌(1980-),男,浙江衢州人,高级实验师,研究方向为无线通信等。Tel.: 13093705327; E-mail: jiangbin@hdu.edu.cn

0 引言

随着可穿戴物联网设备推广,其存储的大量私人信息面临丢失和泄露等问题,故需采取措施来保护实验等场所敏感信息的安全^[1]。传统识别技术(指纹识别、密码验证等)存在需要用户合作、密码遗忘、输入错误的问题^[2],而步态识别技术具有更安全的数据收集程序,不需要显式用户的交互,以及高抗欺诈性的优

点^[3] 通过将传感器集成到各种可穿戴物联网设备中,可以轻易地提取步态信号^[4]。由于 Arduino 源码开放且灵活性强^[5-6],MEMS 惯性传感器体积小且广泛运用于电子设备^[7-8],本文以 Arduino 为硬件平台, Mpu6050 为采集模块,蓝牙为发送模块,研发了成本低、体积小且通用性强的步态数据采集装置,该装置非常适用于高校实验室步态数据的采集与分析,使基于传感器的步态识别更具成本效益。

国外, Muaaz 等^[9]用动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW) 对 48 名志愿者的步态特征作匹配,得到相等错误率(Equal Error Rate, EER) 为 16.26% 的性能; Derawi 等^[10]采用新的交叉 DTW 方法进行特征匹配,得到的准确率为 89.3%。国内,何书芹等^[11]采用多尺度熵和 DTW 结合的方法,得到 EER 为 13.7% 的效果;童伟男^[12]运用多特征 k 最近邻(k -Nearest Neighbor, k -NN) 分类算法,引入权值分配,使准确率达到 87.6%。上述算法在一定条件下实现了步态识别,但其准确率仍不理想。为此,本文提出一种新的步态识别方法,该方法将 DTW 与人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN) 相结合,通过 DTW 对不同长度的步态特征参数进行规整,同时引入步长、步频、步速特征参数,利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM) 优化算法改进后的 BP 神经网络^[13-14]实现步态的识别,该方法在降低采样率和网络训练时间的同时,有效提高了步态识别的准确率,为步态识别的研究提供了新的思路。

1 数据采集

本文所用的实验平台采用 Mpu6050、Arduino 开发板、蓝牙模块 HC-05 构成步态数据采集装置。Mpu6050 具有小体积、高性能、低成本、低噪声的优点,实验采用 $\pm 2 g$ 的加速度计量程,在静止状态下,对 Mpu6050 求平均消除系统误差后,采集三轴加速度值; Arduino 作为开源硬件平台,具有便捷灵活、接口丰富、方便上手的优点,实验采用体积小且功能全面的 Arduino Nano 开发板,其核心处理器为 ATmega328 (Nano3.0),利用与硬件同名的 Arduino 程序开发软件,将编译完的程序通过 USB 线传入 Arduino 控制板,实现程序设计与开发;蓝牙具有低功耗、低成本等优点,实验采用 HC-05 将数据采集装置采集的数据实时传输到 PC 机,实现了数据的存储与传输。实验采集装置如图 1 所示。

实验采集 x 轴(左右方向)、 y 轴(重力方向)、 z 轴(前后方向) 3 个轴上的加速度值,其中 1 名志愿者的原始步态信号如图 2 所示。通过对比,发现重力方向的波形具有良好的周期性和稳定性。因此,本实验选取人体重力方向的加速度信号做步态识别。

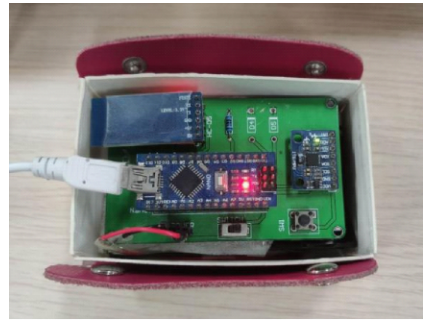
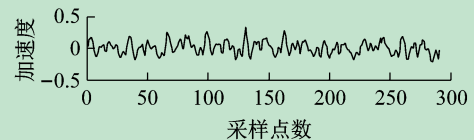
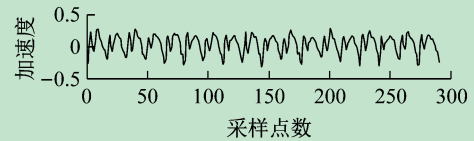


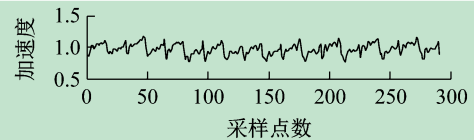
图 1 数据采集装置



(a) x 轴



(b) y 轴



(c) z 轴

图 2 原始步态信号波形图

2 算法描述

2.1 特征提取

步行时支撑腿的动作包括脚跟着地、脚掌支撑、脚跟离地、初始蹬腿等^[15]。这些时刻分别对应重力方向加速度信号的极值点,提取这些极值点作为特征点来进行步态识别具有明确物理意义。采用小波变换过零点方法,即通过高斯函数平滑,将其一阶导数作为小波基函数,找到小波变换后的过零点,提取加速度信号极值点。本实验提取步态周期的幅值及时间特征,并将其保存为幅值序列: $M = [M_1, M_2, \dots, M_n]$ 与时间序列: $T = [T_1, T_2, \dots, T_n]$ 。

由于步行存在偏差,即使是同一人每个周期的采样点也不同,导致样本的时长也不同,所以要进行时间归一化。设每个样本周期有 n 个采样点,将原始的加速度信号归一化到区间 $[0, 1]$ 上,使样本采样点为整个样本相对时间,且可归一化为:

$$T(i) = \frac{t(i) - t(1)}{t(n) - t(1)}, \quad i \in [1, n], \quad T(i) \in [0, 1] \quad (1)$$

图3为志愿者A和B的步态样本信号。从中可以清楚地发现,不同志愿者的步态曲线波动差异较大,而同一志愿者的步态则有很大相似性。特征提取后,差异更加明显。不同志愿者在一个样本周期内,不仅幅值大小不相同,而且相对时间也完全不同,这为步态识别提供了良好基础。

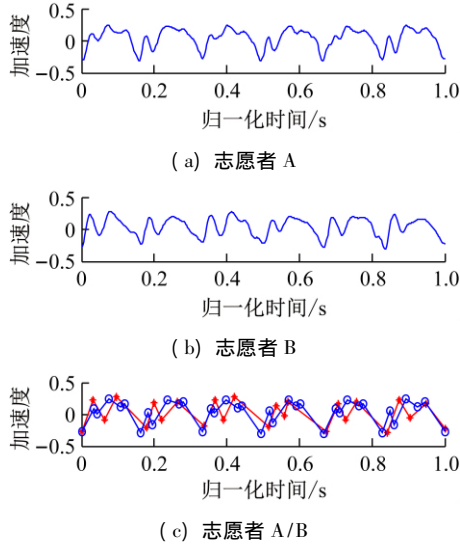


图3 步态样本信号及特征对比曲线图

2.2 动态时间规整算法

因人行走时步态间存在差异,即使从同一志愿者样本提取特征点,其个数也不同。而从不同志愿者样本提取特征点,其个数基本都不同。因此,本实验采用动态时间规整,通过扩展或缩短序列来计算两个序列的相似性。

以志愿者A和B的两个步态周期的幅值特征序列 M_a 、 M_b 为例,设两个特征序列分别为: $M_a = [M_{a1}, M_{a2}, \dots, M_{an}]$, $M_b = [M_{b1}, M_{b2}, \dots, M_{bm}]$,为了将这两个序列对齐,需构建一个 $n \times m$ 矩阵,矩阵中的元素 (i, j) 表示 M_{ai} 和 M_{bj} 两个点间的距离,即 $d = \|M_{ai} - M_{bj}\|$,通过对弯曲函数的约束,最小累积距离的路径有 $(i-1, j)$ 、 $(i-1, j-1)$ 、 $(i, j-1)$ 。此时,最小累积距离可表示为

$$D[i, j] = d(M_a(i), M_b(j)) + \min\{D(i-1, j), D(i-1, j-1), D(i, j-1)\} \quad (2)$$

一个步态周期包括左步态和右步态共两步。由于步态样本长度的选取影响步态识别率,若选取样本长度过长,则处理的数据量将大为增加;否则,提取的样本的特征点不稳定,导致识别率降低。因此,将6个连续步态作为一个样本,每个样本包含3个完整的步态周期。设志愿者A和B的两个参考样本分别为: $S_A = \{M_{A1}, M_{A2}, M_{A3}\}$, $S_B = \{M_{B1}, M_{B2}, M_{B3}\}$,其中 M_{Ai} 和 M_{Bj} 分别表示每个步态周期的特征序列,将两个样本匹配,则 S_A 和 S_B 的幅值失真距离表示为:

$$D(S_A, S_B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{D(M_{Ai}, M_{Bj})}{9} \quad (3)$$

参考样本 S_A 及样本 S_B 中的一个幅值序列匹配路径如图4所示,相应的匹配曲线如图5所示。经动态时间规整后,两条幅值序列具有相同的特征点数,且对比更加直观,不同人的特征点具有很大差异性,将不同幅值序列的特征点都规整到12个点,为BP神经网络的输入提供了数据来源。

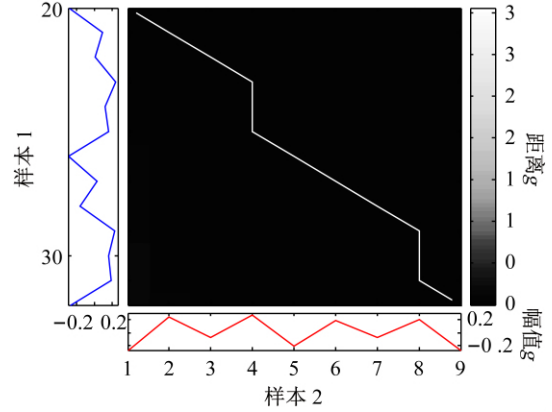


图4 幅值序列的匹配路径

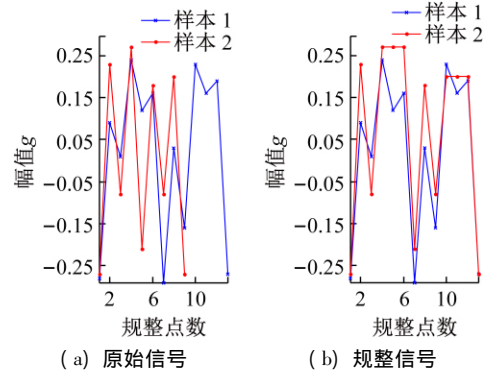


图5 幅值序列的匹配曲线

2.3 改进的BP神经网络

BP神经网络设计需确定隐含层的数量及输入层、隐含层、输出层节点数。在BP神经网络中,虽然隐含层层数的增加能提高识别率,但神经网络的复杂度大大增加。考虑到可穿戴设备中处理器的计算能力较低,为保证步态识别的实时性,本实验只选择一个隐含层。

实验以一个步态周期为基础,第1层为输入层,含有17个输入节点,构成17维输入向量 $(X_1, X_2, \dots, X_{17})^T$,分别表示17个特征参数,特征参数包括经过动态时间规整后的12点幅值序列、正负(1/0)输入、标准偏差STD、步长L、步频c、步速v。设f为采样频率,n为一个步态周期的采样点数,则标准偏差STD、步长L、步频c、步速v的计算公式如下:

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

$$L = \int a(t) dt \quad (5)$$

$$c = f/n \quad (6)$$

$$v = L/T, T = 1/c \quad (7)$$

第 2 层为隐含层, 设 l 为输入层的节点数, n 为输出层的节点数, 则一般情况下隐含层节点数 m 可表示为:

$$m = \sqrt{l+n} + \alpha, \alpha \in [1, 10] \quad (8)$$

确定隐含层节点数范围后, 通过实验训练, 确定本实验隐含层节点数为 7, 激活函数采用连续可微且更接近生物神经元信号的 S 型激活函数。

第 3 层为输出层, 含 2 个输出节点, 构成 2 维输出向量 $(Y_1, Y_2)^T$, 即 $(0, 1)^T$ 表示真实用户; $(1, 0)^T$ 表示仿冒用户。

综上所述, 本文的算法流程图 6 所示。

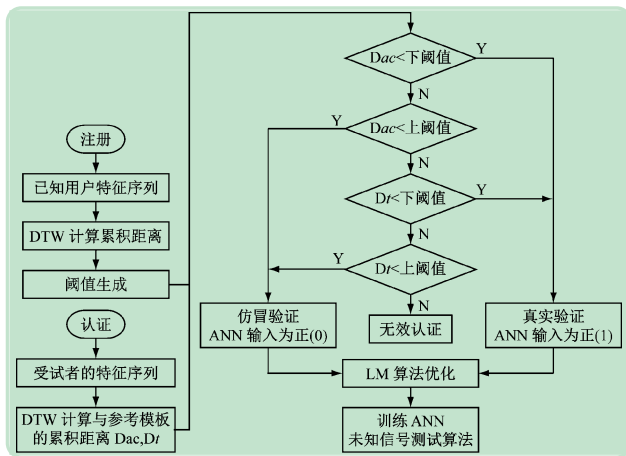


图 6 DTW-ANN 算法流程图

根据图 6 所示的流程图, DTW-ANN 算法的步骤可以简化为以下两个步骤:

(1) 注册阶段。采集已知用户的样本并提取特征序列, 用 DTW 成本函数计算幅值序列和时间序列的累积距离, 分别作拟合函数生成阈值, 并将拥有不同特征数的特征序列规整到 12 点, 解决了 BP 神经网络输入结构固定的问题。

(2) 认证阶段。采集受试者的样本并提取特征序列, 用 DTW 成本函数计算与参考样本幅值序列与时间序列的累积距离 Dac , Dt , 并将其通过二级认证系统初步识别, 运用 LM 算法, 即调节变量因子 u 优化 BP 神经网络, 将 DTW 规整的固定长度特征, 正负输入及步长、步频、步速作为 BP 神经网络的输入节点进行训练及测试。该方法相比单一的 DTW, 能实现更高精度的步态识别, 并且 LM 算法能快速收敛, 确保系统的实时和准确性。

3 结果与分析

本次实验采样频率设置为 40 Hz, 采集了 10 名志

愿者(6 名男性 4 名女性)的步态数据。数据采集时, 将数据采集装置固定在志愿者腰带右侧的位置。志愿者按照其步行习惯, 在水平过道上直线行走 1 min, 3 名志愿者采集 5 d 共采样 25 次, 7 名志愿者采样 5 次。设 A, B, C, D 分别表示不同的志愿者; S_A, S_B, S_C, S_D 分别代表不同志愿者的参考样本; $S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}, S_{A5}, S_{A6}$ 分别表示志愿者 A 的其他 6 个步态样本。通过 DTW 算法分别计算同一志愿者样本间的失真距离和不同志愿者样本间的失真距离, 实验结果如表 1、2 所示。步态识别时, 每次选择 570 个样本组成样本集, 其中 300 个样本来自同 1 名志愿者组成正类, 270 个样本来自其余的 9 名志愿者, 每名志愿者提供 30 个样本组成负类。将 80% 的样本用作训练, 20% 的样本用来测试, 实验结果如表 3 所示。其中 TP, TN 表示正确分类, 分别表示将原先是正类的预测为正类和将原先是负类的预测为负类; 而 FP, FN 表示错误分类, 分别表示将原先是负类的预测为正类和将原先是正类的预测为负类。图 10 为根据 BP 神经网络训练结果绘制的受试者工作特征 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线图。

表 1 用 DTW 计算同一志愿者失真距离

	实验对象					
	S_A/S_{A1}	S_A/S_{A2}	S_A/S_{A3}	S_A/S_{A4}	S_A/S_{A5}	S_A/S_{A6}
幅值失真距离	0.252 3	0.378 1	0.298 4	0.278 9	0.212 6	0.321 9
时间失真距离	0.041 1	0.048 5	0.038 9	0.042 5	0.031 9	0.046 1

表 2 用 DTW 计算不同志愿者失真距离

	实验对象					
	S_A/S_B	S_A/S_C	S_A/S_D	S_B/S_C	S_B/S_D	S_C/S_D
幅值失真距离	0.957 4	0.827 3	1.042 8	0.722 4	0.883 1	0.631 6
时间失真距离	0.132 1	0.140 4	0.179 4	0.104 8	0.125 4	0.091 5

表 3 测试样本的步态识别结果

实验对象	测试样本 总数	BP 神经网络测试结果				准确率 /%
		TP	FN	FP	TN	
A	114	54	6	4	50	91.2
B	114	54	6	3	51	92.1
C	114	55	5	5	49	91.2

由表 1 及 2 可知, 同一志愿者两个样本幅值失真距离和时间失真距离均比不同志愿者样本小, 可通过抽取一定数量样本, 设置成本函数阈值, 自动初步验证样本。将类内最大距离作为下阈值, 类间最小距离作为上阈值, 当测试样本与参考样本失真距离小于下阈值时, 则认为同一人; 而大于上阈值时, 则认为不是同一人。根据采集的数据样本, 计算得幅值的上阈值为

0.561 9,下阈值为0.425 8,时间的上阈值为0.081 4,下阈值为0.054 5。

设置BP网络最大训练次数为10 000次,目标误差为0.001,学习率为0.01,分别用标准BP算法、拟牛顿法、LM算法对网络模型进行训练。训练结果如图7~9所示。由图可知,标准BP算法即使训练到10 000步,均方误差仍为 26.28×10^{-3} ,不能达到理想目标,存在收敛速度慢,容易陷入局部最优解的问题;拟牛顿算法在462步时达到收敛,均方误差为 999.65×10^{-6} ;LM算法仅需23步就能训练完成,此时均方误差为 935.04×10^{-6} 。因此,采用LM对标准BP神经网络改进,在兼顾BP网络识别准确率的情况下,大大减少了训练时间,节省成本的同时提高了效益。

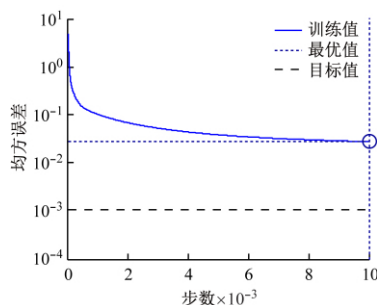


图7 标准BP算法步态识别训练误差曲线

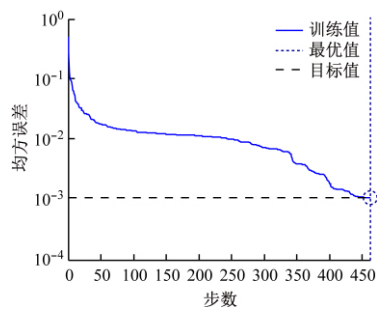


图8 拟牛顿算法步态识别训练误差曲线

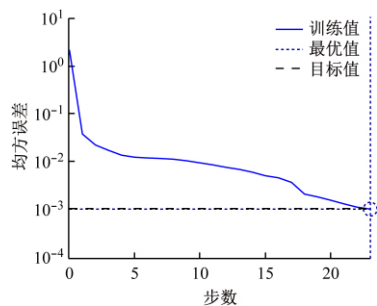


图9 LM算法步态识别训练曲线

将BP神经网络模型的预测结果从小到大排序并把每个概率作为阈值,可以得到多个混淆矩阵。对于每个混淆矩阵可以计算得到特异度(False Positive Rate, FPR)和灵敏度(True Positive Rate, TPR)两个指标。以FPR为x轴,TPR为y轴作图得ROC曲线;以(0,0)为起点,(1,1)为终点做一条直线,两条线的交

点即为EER。由表4及图10可知,对于不同的人,本文平均步态识别率可以达到91.5%,EER为9.1%。相比现有的步态识别算法,识别的准确率大大提高并且有效降低了EER,表明本文所提出的方法具有一定的实用性和有效性。

表4 不同算法结果对比

对比算法	传感器固定位置	EER/%	准确率/%
DTW算法 ^[8]	腰带右侧	16.26	—
交叉DTW算法 ^[10]	腰带右侧	13.7	—
DTW结合多尺度熵算法 ^[9]	腰带右侧	—	89.3
权值分配结合kNN算法 ^[11]	手心	—	87.6
本文方法	腰带右侧	9.1	91.5

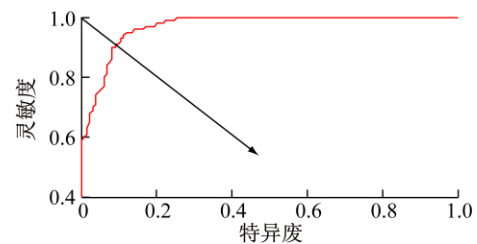


图10 ROC曲线图

4 结 语

本文设计了低成本且通用性强的步态数据采集装置来获取步态加速度信号,在低采样率前提下,提出了一种动态时间规整和人工神经网络相结合的步态识别方案。该方法通过DTW算法,对步态特征序列进行规整,求得失真距离,通过阈值判断自动实现对样本的初步验证,将规整后的特征参数与步长、步速、步频特征相结合,利用LM改进的BP神经网络实现步态识别。与现有方法相比,该方法兼顾采样率和识别率,有效降低了成本且具有较好鲁棒性,符合未来安全认证要求,具有信息安全保护方面的应用价值。

参考文献(References):

- [1] Harbach M, Luca A D, Egelman S. The anatomy of smartphone unlocking: A field study of android lock screens[C]//Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. San Jose: ACM, 2016: 4806-4817.
- [2] Rokanujjaman M, Islam M S, Hossain M A, et al. Effective part-based gait identification using frequency-domain gait entropy features[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 74(9): 3099-3120.
- [3] Sun F, Mao C, Fan X, et al. Accelerometer-based speed-adaptive gait authentication method for wearable IoT devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(1): 820-830.
- [4] Bora N M, Molke G V, Munot H R. Understanding human gait: A survey of traits for biometrics and biomedical applications[C]//2015 International Conference on Energy Systems and Applications. Pune, India: IEEE, 2015: 723-728.

(下转第71页)

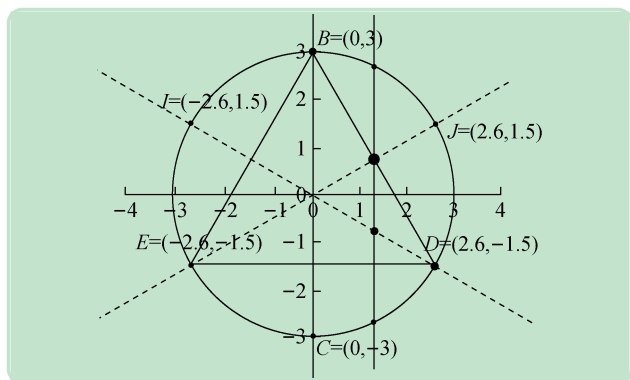


图8 围捕实验3

表3 围捕验证实验3的数据

小车	距围捕点距离/cm	所需时间/s	偏离程度	散热程度
车B	10.7	6.3	较小	微热
车E	15.8	7.6	较大	微热
车D	11.4	5.9	较小	微热

4 结 语

本文利用4辆智能小车组成微群,通过围捕机器人的各种性能测试后,完成了机器人群目标围捕系统设计中围捕方案的设计和方案演示。通过实验验证了4辆小车都能在程序的控制下完成指定动作,并能够完成对目标3种不同路径的围捕,围捕率超过70%,达到预期要求。

参考文献(References):

[1] 鲍庆勇,李舜酩,沈 垣,等. 自主移动机器人局部路径规划综

述[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 1-4.

- [2] Bishop R. Intelligent vehicle applications worldwide [J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2000, 15(1): 78-81.
- [3] 张红涛,赵书尚,韩建海. 基于CMOS传感器的智能小车设计[J]. 河南科技大学学报, 2009, 30(11): 18-20.
- [4] 邬 琦,杨江涛. 一种恒温箱温度控制系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(8): 2455-2458.
- [5] 吴怀宇,程 磊,章 政. 大学生智能汽车设计基础与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [6] 王文伟,毕荣华. 电动汽车技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [7] Chen Q, Ozguner U, Redmill K. Developing a completely autonomous vehicle [J]. IEEE Intelligent Systems, 2004, 19(5): 8-11.
- [8] Romuald A, Jay G. Perception for collision avoidance and autonomous driving[J]. Mechatronics, 2003, 13(10): 1149-1161.
- [9] Martine F J, Toh C-K, Cano J C *et al.* Emergency service in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(2): 6-20.
- [10] 邬 琦,杨江涛,马喜宏. 基于FPGA的高速信号采集电路的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(4): 124-128.
- [11] 徐友春,章永进,王 肖,等. 智能车的研究现状与发展趋势// [C]//第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛论文集. [s. l.]: [s. n.], 2011: 129-133.
- [12] 万 柯,张海燕. 基于单片机和光电开关的通用计数器设计[J]. 计算机测量与控制, 2015(2): 608-612.
- [13] 郑清良,曾泓榕,戴伟强,等. 基于单片机控制的光电能量转换数据采集系统设计[J]. 电工电气, 2012(3): 13-16, 32.
- [14] 徐胜华. 基于STM32的智能扫地机器人研究与设计[D]. 南宁: 广西师范大学, 2016.
- [15] 朱凤春. 移动机器人导航与环境建模问题研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2007.

(上接第29页)

- [5] 黄丽雯,韩荣荣,宋江敏. 基于Arduino/Android的语音控制小车设计[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(12): 53-56.
- [6] 杨振乾,张旭东,王子城,等. 基于Arduino单片机的迈克尔逊干涉仪测量改进[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(1): 50-53.
- [7] Aoike K, Nagamune K. Gait analysis with six axes inertial sensor and force sensor for daily motion [C]//2016 11th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). Japan: IEEE, 2016: 27-28.
- [8] 张秀再,陈彭鑫,吴华娟. 基于MEMS重力检测的数字水平仪[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(3): 51-55.
- [9] Muaz M, Nickel C. Influence of different walking speeds and surfaces on accelerometer-based biometric gait recognition [C]//2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Prague: IEEE, 2012: 508-512.

- [10] Derawi M, Bours P. Gait and activity recognition using commercial phones [J]. Computers and Security, 2013, 39(39): 137-144.
- [11] 何书芹,梁西银,颜昌林,等. 基于多尺度熵和动态时间规整的步态身份识别[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 84-91.
- [12] 童伟男. 基于手机传感器的步态识别的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [13] Shen Y, Liu T, Li Q, *et al.* A wearable sensor system for knee adduction moment measurement [C]//2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). Angkor Wat, Cambodia: IEEE, 2016: 7-12.
- [14] 腾 珂. 基于可穿戴式传感器的多特征步态分析系统设计与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [15] Auvinet B, Berrut G, Touzard C, *et al.* Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device [J]. Gait and Posture, 2002, 16(2): 124-134.

获奖:

中国高校特色科技期刊
中国高校优秀科技期刊
《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
全国高校优秀编辑质量科技期刊
华东地区优秀期刊
上海市高校优秀科技期刊

入选下列网站、数据库、及检索系统:

- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国期刊网》
- 《万方数据——数字化期刊群》
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中文电子期刊服务》
- 《中国学术期刊文摘》(中文版)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 美国《化学文摘》(CA)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 美国《乌利希国际期刊指南》(UIPD)
- 英国《INSPEC》数据库
- 美国《史蒂芬斯数据库》(EBSCOhost)

实验室研究与探索

Research and Exploration in Laboratory

(月刊, 1982年创刊)

(Monthly, Started in 1982)

第39卷 第3期 总第289期

Vol. 39 No. 3 (Serial No. 289)

2020年3月25日出版

Mar. 25, 2020

主办: 上海交通大学

主编: 蒋兴浩

编辑出版: 《实验室研究与探索》编辑部

地址: 上海市华山路1954号

上海交通大学教学三楼456、457室

邮编: 200030

电话: (021) 62932952 62932875

广告热线: (021) 62933165 (带传真)

在线投稿网址: <http://sysy.cbpt.cnki.net>

电子邮箱: sysy@mail.sjtu.edu.cn (办公)

sysydk@163.com (订刊)

sysygy@163.com (广告)

网址: <http://sysy.cbpt.cnki.net>

印刷: 上海商务联西印刷有限公司

广告经营登记证: 3101045000324

国内统一连续出版物号: CN 31-1707/T

国际标准连续出版物号: ISSN 1006-7167

国际期刊编码: CODEN SYYTAA

发行范围: 国内外公开发行

邮发代号: 4-834

定价: 23.5元/册