

# 步态识别现状与发展

金 堃 陈少昌

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430000)

**摘 要** 步态识别是一种生物特征识别技术,目的是通过人们走路的姿态进行身份识别。与其他的生物识别技术相比,步态识别具有非接触、远距离和不容易伪装的优点。步态识别自 1994 年被提出以来发展迅速,而随着算法的提速,步态识别在智能视频监控领域比图像识别更具优势。文中通过对步态识别的原理进行归纳总结,介绍其在识别各阶段的应用;对数据库进行总结和整理,提出了多特征融合识别的方法和前景,展望了身份识别问题的未来发展方向。生物雷达技术的产生和应用将为步态识别提供更多可能。

**关键词** 步态识别,多特征融合识别,数据库,生物雷达技术,人脸识别

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Status and Development of Gait Recognition

JIN Kun CHEN Shao-chang

(School of Electronic Engineering,Naval University of Engineering,Wuhan 430000,China)

**Abstract** Gait recognition is a kind of biometrics technology, which aims to identify people by their walking posture. Compared with other biometrics technology, gait recognition has the advantages of non-contact, long distance and easy to disguise. Since gait recognition was proposed in 1994, it has developed rapidly. With the acceleration of the algorithm, gait recognition has more advantages than image recognition in the field of intelligent video surveillance. This paper summarized the principle of gait recognition and introduced its application in various stages of recognition, and then summarized and sorted out the database, put forward the methods and prospects of multi-feature fusion recognition, and looked forward to the future development direction of identity recognition. The generation and application of bioradar will provide more possibilities for gait recognition.

**Keywords** Gait recognition, Multi-feature fusion recognition, Data base, Biological radar technology, Face recognition

步态是以足带动身体的行进方式,而通过人的行走模式来进行个体身份的识别就叫“步态识别”(gait recognition)<sup>[1]</sup>。步态识别具有不需刻意配合与接触、信息采集距离远、特征难以掩藏的特点,使其在安全防护、医学治疗、防恐防暴、人机交互、嫌疑人搜寻、智能视频监控等领域有了长足发展。但其易受环境、衣着、时间、采集视角等条件影响,从而制约了其进一步推广与应用<sup>[2]</sup>。而人脸识别由于与步态识别存在缺陷互补的关系,因此近期两者的融合识别得到了长足发展。此外生物雷达技术在步态识别上的应用也是值得讨论的方向。本文主要介绍了步态识别的过程、数据库发展情况、步态与其他生物特征融合识别的研究现状以及生物雷达在步态识别上的应用,较为全面地总结了步态识别的原理以及未来发展方向。

## 1 步态识别研究现状

1994 年来自 MIT 媒体实验室的 Niyogi 与 Adelson<sup>[3]</sup>最早对人进行步态识别,他们提出了步态时空模式以及通过 Snakes 方法来确定边界轮廓,在单人识别上取得了初步成功的尝试。2000 年美国 DARPA(美国国防部高级研究计划署)资助的 HID(远距离身份识别)计划从步态识别、人脸识别等

因素上研究对远距离身份识别的影响<sup>[4]</sup>。而国内对步态识别的研究始于中科院王亮博士团队,其创建了多个步态识别数据库,提出了基于人体剪影分析的步态识别方法等一系列理论<sup>[5]</sup>。

近年来,步态识别迅速发展。Kumar 等<sup>[6]</sup>利用最小惯性轴和最外轮廓的距离关系,以区间值符号特征的形式提取步态特征。Bouchrika 等<sup>[7]</sup>通过模型法研究了多因素(如速度、衣物、鞋子等)共同作用下的步态识别<sup>[8]</sup>。Sun 等<sup>[9]</sup>提出了基于 kinect 骨架特征的视图不变步态识别方法。Lishani 等<sup>[10]</sup>使用基于 GEI 的局部多尺度特征描述符进行人类步态识别。刘冠群等<sup>[11]</sup>针对视频监控中步态识别算法准确度较低的问题,提出一种双边傅里叶校正点估计类 Haar 特征模板匹配的多镜头步态识别算法,有效提高了分类识别精度。赵喜玲等<sup>[12]</sup>提出了基于静态能量图和动态群体隐马尔可夫模型的步态识别方法,对角度变化有一定的鲁棒性且减少了噪声对识别的影响。徐守坤等<sup>[13]</sup>提出使用融合 Hog 和 GEI 算法的方法即 SEF-GHEI 能量图提取步态特征,用协同表示的方法进行训练,通过计算测试样本的最小重构误差进行分类,提升了单一视角下及跨视角下的步态识别准确率。

本文受国家自然科学基金(91538201),泰山学者专项经费(ts201511020)资助。

金 堃(1993-),女,硕士生,助理工程师,主要研究方向为电路与系统,E-mail:jinkunhg@163.com;陈少昌(1962-),男,硕士,教授,主要研究方向为电路与系统的电磁兼容性研究,E-mail:gfsfkqp@163.com(通信作者)。

## 2 步态识别过程

目前基于光学图像的步态识别的系统框架如图 1 所示,主要有步态检测、特征提取处理和识别分类 3 个阶段,人体可用于识别的步态特性也分为静态和动态特征<sup>[14]</sup>。

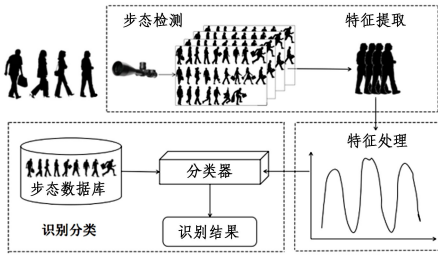


图 1 基于光学图像的步态识别系统框架

图 2 展示了步态识别各个阶段使用的主要算法,强调了使用步态动态识别人类步态模式的标准程序,其涉及以下阶段:从步态动态中提取特征;特征的规范化;选择最相关功能的方法;分类阶段;对识别过程的评估。

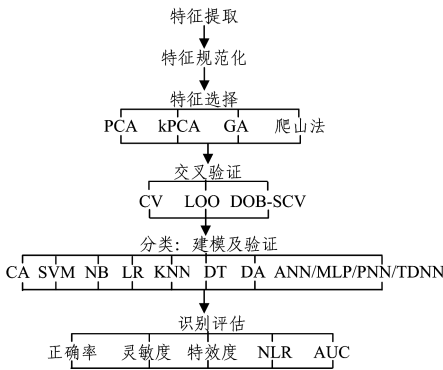


图 2 使用步态动态执行步态识别的标准程序示意图

其中在特征选择方法上主要有线性主成分分析法、基于内核的主成分分析法、遗传算法、爬山法等;在交叉验证环节主要有交叉验证方案、一次性离开等方法;在分类阶段也有多

种建模方式,而在各种步态识别方法的识别评估阶段主要是通过正确率、灵敏度等参数来衡量该方法的优劣<sup>[15]</sup>。

图 2 中使用的首字母缩写词对应于以下内容:线性主成分分析(PCA);基于内核的 PCA(kPCA);遗传算法(GA);交叉验证方案(CV);一次性离开(LOO);分配最优平衡分层 CV(DOB-SCV);聚类分析(CA);支持向量机(SVM);朴素贝叶斯(NB);逻辑回归(LR);K 最近邻居(KNN);决策树(DT);判别分析(DA);人工神经网络(ANN);多层感知器(MLP);概率神经网络(PNN);时间延迟神经网络(TDNN);负似然比(NLR);曲线下面积(AUC)。

## 3 数据库介绍

算法固然重要,但是支撑算法模型训练的数据库往往成为制约性能的瓶颈,而步态识别领域就存在数据库规模小、数量少、多样性少等制约。本节主要总结步态识别数据库的发展及目前较为常用的步态数据库。

最早的步态数据库由加州大学圣地亚哥分校(University of California, San Diego, UCSD)的研究者于 1998 年创建<sup>[2]</sup>,在文献[16-17]中有所提及和使用。UCSD 步态数据库包含 6 人,共 42 个视频序列。而国内最早的步态数据库是由中国科学院自动化研究所在 2001 年创建的 CASIA 步态数据库数据集 A<sup>[18]</sup>。其包含 20 人,共 240 个序列,从 3 个不同的视角进行信息采集。第一个相对较为全面的数据库由佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)所创建,其在采集过程中考虑了环境、采集距离、视角变化等因素,还采集了人体关节的运动信息。而多视角数据库创建于卡耐基-梅隆大学(Carnegie Mellon University),通过行走时用 6 个摄像头从不同的角度进行拍摄来获得数据,对于视角无关的步态识别算法的研究有所帮助。

包含上述数据库在内的常用的公开步态数据库的详情情况如表 1 所列。

表 1 常用的公开步态数据库

数据库	对象数量	序列数量	环境设置	创建时间	影响因素
UCSD <sup>[16-17]</sup>	6	42	室外	1998	—
MIT AI <sup>[19]</sup>	24	194	室内	2001	视角、时间
Georgia Tech <sup>[20]</sup>	20	188	室内、室外 磁跟踪器	2001	视角、时间、距离
CMU Mobo <sup>[21]</sup>	25	600	室内跑步机	2001	6 个视角 速度、携带物、倾斜
HID-UMD 1 <sup>[22]</sup>	25	100	室外	2001	4 个视角
HID-UMD 2 <sup>[22]</sup>	55	220	室外	2001	2 个视角
USF Gait database <sup>[23]</sup>	122	1870	室外	2001	2 个视角 路面、鞋子、携带物
CASIA-A <sup>[24]</sup>	24	240	室外	2001	3 个视角
SOTON Small <sup>[25]</sup>	12	—	室内、室外	2003	视角、鞋子、衣着、 携带物、速度
SOTON Large	115	2128	室内、室外跑步机	2003	视角
SOTON Temporal	20	240	室外	2003	时间、视角
CASIA-B <sup>[26]</sup>	124	13640	室内	2005	11 个视角 衣着、携带物
CASIA-C <sup>[27]</sup>	153	1530	室外、夜晚 红外摄像机	2005	速度、携带物
OU-ISIR Dataset A <sup>[28]</sup>	34	408	室内跑步机	2007	速度
OU-ISIR Dataset B	68	1350	室内跑步机	2007	衣着
OU-ISIR Dataset D	185	370	室内跑步机	2007	步态波动
USMT <sup>[28]</sup>	103	1005	通道环境	2008	多特征、三维

## 4 步态与其他生物特征融合

多特征融合的身份识别可以有效降低识别的错误率。人脸信息和步态信息都易于获取,不需要人为配合,同时两种特征的缺陷存在互补,对于人脸识别影响很大的照明、分辨率等因素对步态识别的影响较小,而制约步态识别效果的衣着、环境等因素人脸识别却有很高的鲁棒性,因此近几年将两者融合识别的研究也在不断深入<sup>[29]</sup>。

国内主流的步态识别与人脸识别融合的方法如下。

2011年,李秩在视频监控图像中自动提取行人轮廓图像及人脸图像并建立了人体自适应三维数学模型,通过对步态图像序列的跟踪,获取行人的关节角度参数。其利用跟踪结果构造模型步态能量图作为步态的整体特征,利用小波变换后的行人下肢关节角度作为步态的动态特征进行步态识别。然后对人脸图像预处理方法和人脸识别算法进行了实验研究,优选出适合远距离身份识别的人脸识别算法。利用超分辨率图像重建技术提高了人脸图像分辨率,从而提高了人脸识别率。最后,利用D-S证据理论、最大法则、最小法则、加法法则、多数投票法等融合算法进行身份识别对比实验。最终证明,D-S证据理论融合步态和人脸进行身份识别的识别率更高<sup>[30]</sup>。

2015年,陈佩瑶<sup>[31]</sup>设计了融合人脸和步态两种生物特征实现身份识别的多生物特征识别方案。其采用了实时性好、准确精度高的单一生物特征提取与分类匹配算法,提出了基于决策层的自适应多生物特征融合识别方法,提高了身份识别的准确率。在人脸识别方面,采用结合Open Cv工具箱的Adaboost级联分类器方法进行多角度人脸检测,并采用非负矩阵分解NMF提取人脸特征,利用欧氏距离矩阵进行人脸识别和分类。步态识别方面,在步态能量图GEI的基础上根据左右步态轮廓线进行步态轮廓图调整,并在此基础上生成动态能量矩阵DEM(Dynamic Energy Matrix),通过PCA主分量分析后,根据相似度函数对每个测试对象进行分类。在多生物特征融合方面,提出了一种基于决策层的多角度人脸和步态的自适应融合识别方法。该方法提取人脸和步态特征并分别获取测试图像到训练图像库的欧氏距离数组集合,利用非线性规划对每个生物特征的距离匹配值进行自适应分配权值,以获得最优的联合匹配分数,达到最好的信息融合结果。由于该融合权值会随着不同的测试对象和角度发生变化,因此有一定的实时性和适应性。

2016年,余杰<sup>[32]</sup>提出了一种基于人体模糊跟踪的人脸跟踪获取算法(Human Body Fuzzy Tracking Based Face Tracking and Capturing Algorithm, B-FTC)。该算法首先根据目标身体各肢体部分特征及运动一致性匹配跟踪定位目标的身体,然后根据目标头部与身体的位置及运动相关性定位获取目标的脸部图像。在对目标身体跟踪识别的同时,引入了在线特征学习更新机制以应对目标的外观特征的逐步变化。实验结果证明,该算法对目标头部姿态、镜头视角、脸部表情等变化,以及脸部局部遮挡、化妆、伪装等不利因素具有完全的鲁棒性,同时具有极好的脸部跟踪获取及归属分类效果。

2018年,Punyanani提出了一种系统<sup>[33]</sup>,采用决策级融合

方法,将人脸分类器的顶级匹配传递给步态分类器,然后确定未知人的身份。对于人脸识别,采用基于主成分分析的方法以及基于贝叶斯推理的分类器;而对于步态识别,实施基于模型策略,其利用被识别为与识别最相关的各种步态特征基于使用光电运动捕捉系统收集的数据。此外,Hou实现了以分层方式利用不同分辨率来识别整个脸部以及各种脸部组件系统<sup>[34]</sup>,发现其比仅使用最高分辨率图像的单层对应物能获得更高的准确性。

## 5 生物雷达在步态识别上的应用

近年来,生物雷达技术发展迅猛,基于生物雷达的人体步态信号非接触检测技术具有不受光线影响、可全天候识别,可穿透衣物、伪装甚至墙壁,可在烟、尘、雾等能见度低的天气条件下使用等优势<sup>[35]</sup>。基于生物雷达的人体步态信号非接触检测技术主要包含生物雷达技术、人体步态信号提取技术及信号处理技术,处理过程如图3所示。

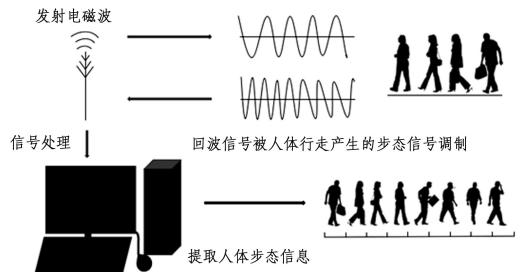


图3 基于生物雷达的人体步态信号非接触检测技术原理

目前,国内外对于人体步态非接触检测的研究主要利用超宽带生物雷达,连续波雷达的使用较少<sup>[36]</sup>。但连续波雷达的多普勒效应对人体步态检测具有重要意义。Geisheimer等利用一台10.5 GHz的连续波雷达来检测人体行走产生的微多普勒信号,并使用短时傅立叶变换与线调频小波变换(Chirplet Transform, CT)对信号进行处理,从人体步态信号中获取了不同的特征<sup>[37]</sup>。Otero等详述了利用连续波雷达获取人走路时产生的多普勒特征信号,并利用傅立叶变换分析信号。这些关键特征信号在人类行走运动中具有代表性。他们针对不同性别的人进行了实验,并开发了一个简单的分类系统来进行识别<sup>[38]</sup>。Zhang将不同的时频分析方法应用于人体步态雷达回波多组分非平稳信号分析,并通过这些分析得到了人体步态时频特征,为今后的研究奠定了基础<sup>[39]</sup>。

基于生物雷达的人体步态非接触技术从提出到实现,依赖于生物雷达技术及信号处理技术的发展。生物雷达技术的革新及新的、更有效的信号处理技术的出现,都将为基于生物雷达的人体步态非接触技术的发展带来新的契机<sup>[40]</sup>。

**结束语** 本文详细介绍了步态识别在国内外的发展现状、识别流程以及常用的数据库情况,并针对步态识别的局限进行了多特征融合识别方法的讨论,集中介绍了人脸识别与步态识别的融合识别过程。此外对于目前还是起步阶段的基于生物雷达技术的步态识别方法及研究现状加以阐述。

可以得知,人们正在仿照人类的认知方式,利用多感官融合技术来不断提升人物识别与追踪的能力。尤其是人脸识别与步态识别技术的融合,目前在人物识别领域的应用还只是

刚刚起步,其中的大量研究还有待于探索。作为身份识别的前进方向之一,人脸与步态识别融合的研究还有可以继续改进之处:利用不同融合策略使整体效果得到提升;探索利用不同的适应机制来改变权重;利用最新的人工智能、监督与非监督学习技术,在提供海量数据的前提下,让机器进行不断地自我深度进化学习等<sup>[41]</sup>。而基于生物雷达的人体步态非接触技术在未来也将在医学研究领域、人体步态成像、生物雷达的小型化方面有所发展,对于生物识别起到促进作用。

在未来,随着计算机视觉技术的发展,在各种需求的刺激下,步态分析与识别必定有更大的发展。同时步态分析与识别也会促进计算机视觉技术的发展。

### 参 考 文 献

- [1] WANG L, NING H Z, TAN T N, et al. Fusion of static and dynamic body biometrics for gait recognition[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(2): 149-158.
- [2] 于仕琪. 多视角步态分析与识别[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2007.
- [3] SHAKHNAROVICH G, LEE L, DARRELL T. Integrated face and gait recognition from multiple views[C]// *Proc. of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Hawaii, USA, 2001: 1439-1446.
- [4] 王科俊, 侯本博. 步态识别综述[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(7): 1152-1160.
- [5] 徐万江. 基于特征子空间的跨视角步态识别研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- [6] KUMAR H P M, NAGENDRASWAMY H S. Gait recognition: An approach based on interval valued features[C]// *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. IEEE, 2013: 1-6.
- [7] BOUCHRIKA I, NIXON M S. Exploratory factor analysis of gait recognition[C]// *2008 the 8th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition, FG '08*. IEEE, 2008: 1-6.
- [8] 王阳. 基于特征点匹配的步态识别[J]. *传感器与微系统*, 2018(1): 137-140.
- [9] SUN J, WANG Y, LI J, et al. View-invariant gait recognition based on kinect skeleton feature[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2018, 77(19): 24909-24935.
- [10] LISHANI A O, BOUBCHIR L, KHALIFA E, et al. Human gait recognition using GEI-based local multi-scale feature descriptors [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2018(13): 1-16.
- [11] 刘冠群, 罗桂琼, 谭平. 基于类 Haar 特征模板匹配的多镜头步态识别算法[J]. *计算机工程*, 2017, 43(12): 231-236.
- [12] 赵喜玲, 张晓惠. 基于动态特征和静态特征融合的步态识别方法 [J]. *湘潭大学自然科学报*, 2017(4): 89-91.
- [13] 徐守坤, 邱亮, 石林, 等. 基于 SEF-GHEI 及协同表示的步态识别研究[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(7): 294-297, 321.
- [14] 叶波, 文玉梅. 基于步态的人身份识别技术综述[J]. *计算机应用*, 2005, 25(11): 2577-2580.
- [15] FIGUEIREDO J, SANTOS C P, MORENO J C. Automatic recognition of gait patterns in human motor disorders using machine learning: A review[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2018, 53: 1-12.
- [16] LITTLE J J, BOYD J E. Recognizing people by their gait: the shape of motion[J]. *Videre: Journal of Computer Vision Research*, 1998, 1(2): 2-32.
- [17] HAYFRON-ACQUAH J B, NIXON M S, CARTER J N. Automatic gait recognition by symmetry analysis[C]// *Proc. of 3rd International Conference on Audio and Video Based Biometric Person Authentication*. Halmstad, Sweden, 2001: 272-277.
- [18] Center for Biometrics and Chinese Academy of Sciences Security Research, Institute of Automation[OL]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn>.
- [19] TANAWONGSUWAN R, BOBICK A. Performance Analysis of Time Distance Gait Parameters under Different Speeds[C]// *Proc of the 4th International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication*. Guildford, UK, 2003: 715-724.
- [20] CUNTOOR N, KALE A, CHELAPPA R. Combining Multiple Evidences For Gait Recognition[C]// *Proc of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Hang Kong, China, 2003: 33-36.
- [21] CHALIDABHONGSE T, KRUGER V, CHELAPPA R. The UMD Database for Human Identification at a Distance[R]. Technical Report. College Park, USA: University of Maryland, 2001.
- [22] GROSS R, SHI J. The CMU Motion of Body (MoBo) Database [R]. Technical Report, CMU-RI-TR-01-18. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University, 2001.
- [23] NIXON M, CARTER J, SHUFLE J, et al. Experimental Plan for Automatic Gait Recognition[R]. Technical Report. Southampton, UK: University of Southampton, 2001.
- [24] SARKAR S. The Human ID Gait Challenge Problem: Data Sets, Performance and Analysis[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 7(2): 162-177.
- [25] YU S Q, WANG L, HU W M, et al. Gait Analysis for Human Identification in Frequency Domain[C]// *Proc. of 3rd International Conference on Image and Graphics*. Hong Kong, China, 2004: 282-285.
- [26] YU S Q, TAN D L, HUANG K Q, et al. Reducing the effect of noise on human contour in gait recognition[C]// *Proc. of 2nd IAPR International Conference on Biometrics*. Seoul, Korea, 2007.
- [27] TAN D L, YU S Q, HUANG K Q, et al. Walker recognition without gait cycle estimation[C]// *Proc. of The 2nd International Conference on Biometrics*. Seoul, Korea, 2007: 222-231.
- [28] SEELY R D, SAM ANGOOEI S, LEE M, et al. The University of Southampton Multi-Biometric Tunnel and Introducing a Novel 3D Gait Dataset[C]// *Proc of the 2nd IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems*. Washington, USA, 2008: 1-6.
- [29] 刘若水, 关羽, 杨薇. 人脸与步态识别技术在人物识别与追踪领域的应用[J]. *河南科学*, 2017, 35(8): 1232-1236.
- [30] 李轶. 基于步态与人脸融合的远距离身份识别关键技术研究

- [D]. 天津:天津大学,2011.
- [31] 陈佩瑶. 监控视频下融合多生物特征的身份识别研究[D]. 华北电力大学,2015.
- [32] 余杰. 基于视频的人体目标跟踪与识别技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [33] PUNYANI P, GUPTA R, KUMAR A. Human age-estimation system based on double-level feature fusion of face and gait images[J]. *International Journal of Image & Data Fusion*, 2018(4):1-15.
- [34] HOU X, LIU Z. Fusion of Face and Gait for Human Recognition in Video Sequences[C]// *International Conference on Information Technology and Computer Science*. IEEE, 2008:577-580.
- [35] 王帅杰, 李钊, 王梦梦, 等. 基于生物雷达的人体步态非接触检测技术研究进展[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2017, 40(1):46.
- [36] 王帅杰, 李钊, 张华, 等. 一种基于连续波生物雷达的人体步态非接触检测系统[J]. *中国医疗设备*, 2016, 31(12):26-30.
- [37] GEISHEIMER J L, MARSHALL W S, GRENEKER E. A continuous-wave(CW) radar for gait analysis: Signals[C]// *35th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*. Pacific Grove, United States: IEEE, 2001:834-838.
- [38] OTERO M. Application of a continuous wave radar for human gait recognition[C]// *Signal Processing, Sensor Fusion, and Targetm Recognition*. Orlando, United States: International Society for Optics and Photonics, 2005:538-548.
- [39] ZHANG J. Basic gait analysis based on continuous wave radar [J]. *Gait & Posture*, 2012, 36(4):667-671.
- [40] 王曦泽. 连续波生物雷达的关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [41] 薛召军, 靳静娜, 明东, 等. 步态识别研究现状与进展[J]. *生物医学工程杂志*, 2008(5):1217-1221.

(上接第5页)

- [9] ROSTANSKI M, GROCHLA K, SEMAN A. Evaluation of highly available and fault-tolerant middleware clustered architectures using RabbitMQ[C]// *Computer Science and Information Systems*. IEEE, 2014:879-884.
- [10] AYANOGLU E, AYTAS Y, NAHUM D. Mastering RabbitMQ [M]. Packt Publishing, 2016, 1:76-77.
- [11] TKRAMER J. Advanced message queuing protocol (AMQP) [M]. Belltown Media, 2009.
- [12] VIDELA A, VIDELA A. RabbitMQ in Action[M]. Manning Publications, 2012.
- [13] GILLES. Kafka: toward a minor literature [M]. University of Minnesota Press, 1986.
- [14] ESMALI K S, ESMALI K S. Kafka versus RabbitMQ: A comparative study of two industry reference publish/subscribe implementations; Industry Paper[C]// *ACM International Conference on Distributed and Event-Based Systems*. ACM, 2017:227-238.
- [15] PROULX T, HEINE S J. Connections from Kafka: exposure to meaning threats improves implicit learning of an artificial grammar[J]. *Psychological Science*, 2009, 20(9):1125.
- [16] COMPUTING C C, WANG M H, LI Y, et al. Redesigning Kafka Message Queue System; Toward a Decentralized Stateful Broker System[J]. 2017.
- [17] GARG N. Apache Kafka[M]. Packt Publishing Ltd, 2013.
- [18] HENJES R, SCHLOSSER D, MENTH M, et al. Throughput Performance of the ActiveMQ JMS Server[M]// *Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS)*. DBLP, 2007:113-124.
- [19] IONESCU V M. The analysis of the performance of RabbitMQ and ActiveMQ[C]// *Roedunet International Conference-Networking in Education and Research*. IEEE, 2015:132-137.
- [20] KLEIN A F, STEFANESCU M, SAIED A, et al. An experimental comparison of ActiveMQ and OpenMQ brokers in asynchronous cloud environment[C]// *Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications*. IEEE, 2015:24-30.
- [21] HENJES R, MENTH M, HIMMLER V. Impact of Complex Filters on the Message Throughput of the ActiveMQ JMS Server [M] // *Managing Traffic Performance in Converged Networks*. Springer Berlin Heidelberg, 2007:192-203.
- [22] CHEN G, DU Y, QIN P, et al. Design and Realization of ActiveMQ Based High Performance Message Cluster[C]// *International Conference on Chemical Science and Engineering*. 2013.
- [23] ZHANG Y, XU L X. Feature and Configuration Research of ActiveMQ[J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*, 2011, 12:6-13.
- [24] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F, et al. OpenWire (binary protocol)[M]. Betascript Publishing, 2010.
- [25] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F, et al. WS-Notification[M]. Betascript Publishing, 2010.
- [26] MILLER J. A Feature Set for the Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP)[J]. *China Educational Technology*, 2015, 17:2025-2032.
- [27] SNYDER B, BOSANAC D, DAVIES R. ActiveMQ in Action [M]. Manning Publications Co, 2011.
- [28] LIAO J, ZHUANG X, FAN R, et al. Toward a General Distributed Messaging Framework for Online Transaction Processing Applications[J]. *IEEE Access*, 2017, PP(99):1.
- [29] WANG X R, WANG X R, FENG J. From Alibaba to Apache: RocketMQ's Past, Present, and Future [EB/OL]. <https://www.infoq.com/articles/alibaba-apache-rocketmq>.
- [30] MA Y, YAN R, SUN J, et al. A MQTT Protocol Message Push Server Based on RocketMQ[C]// *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2017:295-298.
- [31] The Apache Software Foundation. RocketMQ Architecture[EB/OL]. <http://rocketmq.apache.org/docs/rmq-arc>.
- [32] HINTJENS P. ZeroMQ: messaging for many applications[M]. O'Reilly Media, Inc. , 2013.
- [33] FENGPING P, JIANZHENG C. Distributed system based on ZeroMQ[J]. *Electronic Test*, 2012, 7(7):24-29.
- [34] HINTJENS P. ZeroMQ: 云时代极速消息通信库[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.
- [35] CARLSON J L. Redis in action[M]. Manning Publications Co. , 2013.
- [36] CARLSON J L. Redis in Action [M]. Manning Publications Co. , 2012.