

步态识别综述

王科俊 侯本博

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要 步态识别是生物特征识别领域一个新的研究方向,它旨在根据人们走路的姿势进行身份识别。本文首先对步态识别的影响因素与性能预测进行了概括,然后从运动检测、周期检测、特征提取、识别算法4个方面对当前研究成果进行了全面的综述,最后讨论了当前研究的难点与发展趋势。

关键词 步态识别 性能预测 运动检测 周期检测 特征提取 数据融合

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)07-1152-09

A Survey of Gait Recognition

WANG Ke-jun, HOU Ben-bo

(Automation Department of Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract As a new direction in biometric, gait recognition aims to recognize individuals by the way they walk. In this paper, influencing factors and performance prediction to gait recognition are generalized at first. Subsequently, four major issues involved in a gait recognition system are reviewed in detail, namely motion detection, period detection, feature extraction and recognition methods. Finally, some research challenges and future directions in gait recognition are discussed.

Keywords gait recognition, performance evaluation, motion detection, period detection, feature extraction, data fusion

1 引言

步态识别是近年来计算机视觉和生物特征识别领域的一个备受关注的研究方向,它旨在根据人们走路的姿势进行身份识别。与其他生物特征识别技术(例如指纹,人脸等)相比,步态识别的优势在于非接触性、非侵犯性、易于感知、难于隐藏、难于伪装^[1]。基于上述特点,步态识别在门禁系统、安全监控、人机交互、医疗诊断等领域具有广泛的应用前景和经济价值,因此激发了国内外广大科研工作者的研究热情。美国 DARPA(美国国防部高级研究计划署)2000 年重大研究项目—HID(远距离身份识别)计划联合了马里兰大学、麻省理工学院、卡耐基梅隆大学等诸多知名院校参与,其研究重点在于通过远距离的步态识别和动态人脸识别以及不同因素

对远距离身份识别的影响。HID 计划对步态识别的研究产生了深远的影响,在一定程度上也促进了计算机视觉技术的发展。

步态分析一直是医学、心理学的研究课题,医学研究认为^[2,3],如果考虑步态运动的所有信息,那么步态就是唯一的。Johansson^[4,5]发现通过观察附在人身上的信号灯(MLD)的运动就能够判断出人的运动模式;Kozlowski 和 Cutting^[6]利用 MLD 来识别人的性别;Cutting 和 Kozlowski^[7]通过 MLD 证明了人可以识别自己的朋友。利用步态进行身份识别,在很大程度上是受到 Johansson 实验的启发。最早利用步态进行人的识别是由 Niyogi 与 Adelson^[8]提出的,之后出现了多种识别方法^[7,9-12]。

一直以来,步态分析的应用研究主要集中在临床医学方面^[13-15],近年来步态识别才引起了研究人员越来越多的关注,其中不乏相关的综述文章。文

收稿日期:2006-03-24;改回日期:2006-05-26

第一作者简介:王科俊(1962~),男,博士,博士生导师。主要从事生物特征识别、神经网络理论与应用、智能控制等方向的研究。出版学术专著3部,发表论文120余篇,获省部级科技进步二等奖2项,三等奖3项。E-mail: wangkejun@hrbeu.edu.cn

献[16]对2003年以前的步态识别研究进行了回顾,并指出了未来的研究方向,但该文缺乏对步态识别的性能预测和具体的难点分析;文献[17]对步态识别的一些方法和影响因素(2003年以前)进行了概述,但是缺乏难点分析和未来研究方向指导。文献[18]主要从特征提取和特征处理方面对当前研究成果进行了概述,文献[19]从步态处理的各阶段进行了简要的总结。此外,上述4篇文献都缺乏周期检测方面的阐述。为了使广大科研工作者对步态识别的发展和最新动态有更加全面和深刻的了解,本文首先阐述了影响步态识别的各种因素和步态作为生物特征识别的性能预测,随后从步态识别的先后处理阶段:运动检测、周期检测、特征提取、识别算法4个方面进行了回顾,最后阐述了步态识别研究难点及发展趋势。

2 影响因素与性能预测

为了对步态识别进行全面的阐述,就需要考虑对其识别率造成影响的各种因素以及步态识别作为生物特征识别的潜力分析——步态识别的性能预测。

2.1 影响因素

为了提高步态识别的识别率,必须首先分析对其造成影响的各种因素,然后采取相应的措施克服上述影响,以达到期望的性能。需要指出的是,根据具体的应用环境的区别和特征提取的差异,影响步态识别的因素也不尽相同。结合文献[9]、[10]、[16]、[17]、[20],下面分析影响步态识别的各种因素。

时间——时间变化一般会造成背景、服饰、鞋帽等的差异,特别是时间跨度比较大时(比如6个月),它所导致的差异是非常巨大的^[9,10]。当然,随着年龄的增长,人的步态会发生一定的变化^[21-23],但当前的研究主要是针对成年人展开的,且时间跨度一般都在一年以内^[16,24]。在基于形状的步态识别中,时间的变化对识别性能的影响远大于其他因素^[9];在基于模型的步态识别中,时间变化导致的轮廓变化对于特征的提取也会造成一定的影响。

服饰——服饰变化对提取的人体轮廓会产生比较大的影响。

行走路面——行走路面造成的影响主要包括小腿以下(特别是脚踝以下)的轮廓提取以及由于特

殊路面对人的行走方式产生的影响。例如在草地上行走时,草丛会对人脚的一部分产生遮挡,这对轮廓提取会造成很大的影响;而在马路上行走时我们可以清晰的看到人体的各个部分。文献[9]、[10]通过实验说明了行走路面对识别性能的影响仅次于时间变化的影响。

视角——视角变化会导致提取的人体轮廓的巨大变化,这对特征的选择和提取都会产生大的影响^[11]。根据目前的研究,似乎侧面视角的人体轮廓包含了更有价值的信息,特征提取绝大多数^[7,24-29]也都是基于侧面轮廓的,当然也有视角无关的特征提取和识别方法^[30,31]。

鞋帽——鞋帽造成的影响主要是指提取的轮廓差异。

背包等携带物——文献[32]的研究表明随着负重的增加,人的行走速度和步调明显降低,并且双撑时间逐渐延长;其他相关的研究可以参见文献[9]、[10]。

其他影响步态识别性能的因素还包括遮挡、地形^[33,34]、伤病、疲劳^[35]、行走速度^[36]、特定训练(士兵的步态)以及心理变化等,在众多因素中,当前研究的重点在于时间、服饰、行走路面、视角和鞋帽造成的影响。步态特征的提取都是以提取的人体轮廓图像为基础的,各种因素对识别性能造成的影响都是通过对人体轮廓图像的影响间接反映出来的,因此在基于形状的步态识别中,人体轮廓图像的变化对识别性能产生的影响比较大;在基于模型的步态识别中,人体轮廓图像的变化对于特征的提取和识别性能也会造成一定的影响。

2.2 性能预测

在步态识别的众多文献中,却很少涉及步态识别总体性能预测的精确阐述。当前步态识别的研究处于初期阶段,如果缺乏理论和实践方面对其总体识别性能评定及预测,从长远发展的观点来看将会导致研究的盲目。

Han 和 Bhanu^[37]阐述了步态识别的性能预测。利用人体各部分尺度分布的统计知识,并且假设人体各部分的尺度特征相互独立地服从同样的高斯分布,他们绘制了理想情况下识别率随数据库规模、类内尺度特征的标准差变化的曲线以及识别率的上限随数据库规模、图像分辨率变化的曲线。他们的仿真结果显示识别率随数据库规模的增大而显著地降低,同时图像分辨率和类内尺度特征的标准差的增

大也对识别性能造成很大的影响。通过与实验数据的对比,发现识别性能低于预测的结果,因为摄像机校准误差、轮廓图像分割误差、匹配误差、身体自遮挡、识别算法等都会对识别率造成影响。

Sarkar 等人^[9]将步态与人脸的性能进行了对比,由于识别性能与数据库规模相关,文中只对验证做了测试与比对(FRVT2002——面向识别商家测试)。实验结果显示对于时间间隔较长的情况,步态性能还有待进一步提升。值得注意的是,文中采用的仅是处于起步阶段的基线算法,而人脸的研究已开展了十几年时间。随着性能更加优越的算法的提出与改进,步态与人脸将一搏高下。

文献[9]、[37]的研究成果对大型数据库规模的识别性能研究将发挥重要的指导作用,同时也将促进研究人员展开更加深入的研究以充分发掘步态识别的潜力,推进其实用化的进程。

3 研究动态

步态识别就是要对包含人体运动的图像序列进行分析处理,通常包含运动检测、周期检测、特征提取、识别算法 4 个过程,其一般处理框架如图 1 所示。需要指出的是,针对当前研究现状(即可视范围一般只有一个人)这里不再阐述运动跟踪方面的内容,相关研究可参考文献[38]~[40]。

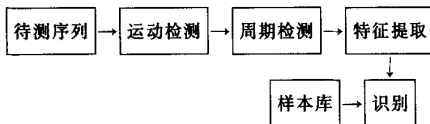


图 1 步态识别框图

Fig. 1 Framework of gait recognition

3.1 运动检测

运动检测的目的是从视频序列的场景图像中检测、提取出运动目标。智能监控系统中的后续处理(例如运动目标分类、跟踪、行为分析和理解等)都是在检测出来的运动区域上进行的,因此运动目标的有效检测对这些后续处理具有非常重要的意义。然而,在实际的观测系统中,由于光照、影子、背景扰动等^[41]因素造成的背景图像的动态变化使得有效的运动检测成为一项挑战性的工作。智能监控系统中运动检测的方法大致分为 4 类:基于特征的方法^[42]、帧间差分法、背景减除法、光流法。

3.1.1 基于特征的方法

基于特征的方法包含两个主要的步骤,一是从视频图像序列中提取特征并建立它们之间的对应关系;二是依据特征的对应关系计算物体的结构和运动参数。根据采用特征的不同,基于特征的方法又可分为基于大尺度特征和基于小尺度特征的方法。基于大尺度特征的方法通常采用物体的边界轮廓作为特征,Yuna 与 Siwei^[43]、Blake 等人^[44]使用主动轮廓模型(active contour model)对运动目标进行检测和跟踪;基于小尺度特征的方法通常采用物体的边缘、拐角等作为特征,对非刚体目标的运动检测与跟踪常用 Hausdorff 方法^[45,46]。基于特征的方法能够很好地刻画目标的运动,但是特征点的寻找和匹配比较困难,同时由于缺乏快速算法,也限制了其在实时智能监控系统中的应用。

3.1.2 帧间差分法

帧间差分法利用视频序列中连续两帧或 3 帧图像亮度变化来提取运动目标。Lipton 等人^[47]使用连续两帧图像的差分检测运动目标;Collins 等人在文献[48]中提出了一种 3 帧时间差分方法,改善了对噪声的敏感性;Chang 等人^[49]改进了传统的帧间差分方法,结合连通分量标记、形态学闭运算和人体结构分析来滤除噪声和阴影的影响提取运动目标;Guo 等人^[50]利用帧间差分和熵相结合的方法有效地检测运动目标。帧间差分法方法简单,运算速度快,易于实现,能较快适应动态场景的变化;其不足之处在于对噪声敏感,运动物体内部亮度较均匀时只能检测到目标的边缘,无法检出整个物体。

3.1.3 背景减除法

背景减除法是利用当前帧图像与背景图像的差分运算进行运动检测的一种方法。背景减除法的关键是背景模型的构造,其中自适应背景建模是其研究的重点。Wren 等人^[51]用高斯分布来表示每个像素的颜色强度,研究了室内人体的运动检测与跟踪;Friedman 和 Russell^[52]将像素的灰度值看作是背景、前景和阴影 3 个高斯分布的加权,同时采用 EM(期望最大化)算法获得模型参数;Stauffer 和 Grimson^[53]对文献[52]的方法进行了改进,采用 K 个高斯分布的混合模型建模背景像素的分布规律;Magee^[54]建立了多个前景模型与文献[53]中方法相结合,实现了更为有效的运动检测;Javed 等人^[55]利用颜色和边缘信息进行背景相减,算法包括像素级、区域级、帧级处理;Elgammal 等人^[56]提出一种无

参数的核密度估计算法,提高了运动检测的灵敏性; Kruger 等人^[57]使用了基于概率模型的背景去除方法。这类方法一般能够提供完全的特征数据,但对由于光照及其他外界扰动引起的场景变化特别敏感,主要应用于静止背景的情况。

3.1.4 光流法

光流法是一种以灰度梯度基本不变或亮度恒定的约束假设为基础的运动目标探测的有效方法。Sidenbladh^[58]利用浓度光流特征来训练 SVM(支持向量基),从而检测人的运动;Ishiyama 等人^[59]使用线形光流算法实现了高速、高精度的光流检测,随后最小生成树被用来进行运动分割。光流反映了序列图像中的速度场,光流法善于在运动场景中捕捉运动对象的运动特性,但是大多数光流法的计算比较复杂并且抗噪性比较差,这就阻止了它在实时智能监控系统中的应用。

此外,还有其他的一些方法,Wu 等人^[60]使用正交的高斯-厄尔米特矩来检测运动目标;Nagano 等人^[61]提出了一个通用的模型,输入的时空信号被分成许多部分重合的局部区域,然后使用 Gabor 滤波器对局部区域执行时空频率分析,最后将所有局部输出综合在一起检测运动。

3.2 周期检测

依据背景环境的差异,通过对检测出的运动目标进行最大连通域分析或采用其他一些目标分类的方法,可以从图像序列中提取出人体区域。随后,就要处理步态识别中一个重要的环节:周期检测。Culter 等人^[62]通过计算人体轮廓随时间变化的自相似性,利用自相关分析提出了一个周期检测的通用方法,但是这种方法计算量非常大;BenAbdelkader 等人^[63]根据人体区域绑定框的宽度信号分析了步态序列的周期性,并给出了侧面视角和偏离侧面视角较大情况下的周期计算方法;Collins 等人^[11]分析了 CMU Mobe 步态库中 6 个视角下人体宽度和高度信号周期变化,并据此提取步态序列的关键帧以降低计算复杂度;Sarkar 等人^[9]则利用人体区域下半部分的像素点数随时间变化的曲线(双撑时像素点数最大,单撑时像素点数最小)来计算步态的周期,这种方法只对接侧面视角的情况有效,而对正面视角就要选择其他方法,Wagg 等人^[64]采用了类似的周期度量方法;Kale 等人^[29]则利用人体宽度向量的泛数随时间变化曲线来分析步态周期。综上所述,考虑到计算复杂度和实时处

理的需求,当前步态周期检测主要是通过分析人体宽度信号或人体区域像素点数来实现的。

3.3 特征提取

特征提取直接影响最终的识别性能,根据特征提取的差异可将步态识别的方法广义地分为两类:基于模型的方法和非模型的方法。基于模型的方法首先要建立人体结构模型或者是人体运动模型,然后获取特征;非模型的方法无需建立这些模型,而是从其他方面提取特征。

3.3.1 基于模型的方法

基于模型的方法对人体结构或人体运动建模后,将 2 维图像序列数据与模型数据进行相关匹配来获取特征或模型相关参数。对于基于人体结构模型的方法,通过将序列图像的每帧与模型匹配获取可变形模板的参数(如角度,轨迹信息);而基于人体运动模型的方法则通过学习个体的运动参数来识别个体。下面介绍几种主要的模型:

(1) 椭圆模型

在椭圆模型中, Lee 等人^[65]用 7 个椭圆来建模人体的各个部分,提取椭圆参数(长短轴之比、质心坐标、主轴夹角)以及人体结构参数(质心坐标)共 29 个参数作为步态识别的特征。

(2) 钟摆模型

Cunado 等人^[66]将大腿建模为连接的钟摆,并从其倾斜角度信号的频率分量中获取步态特征。Yoo 等人^[67]采用类似的线状人体模型,通过线性回归分析,获取身体各部分的角度信号;Yam 等人^[68]采用耦合钟摆模型刻画大腿和小腿的运动,通过对摆动的周期分析获得相位加权的傅里叶描述的步态信号。

(3) 3 维模型

为克服 2 维模型中遮挡、运动方向变化带来的问题,Urtasun 等人^[69]将 Cunado 等人^[66]的方法扩展到 3 维空间,提出了基于 PCA(主元分析)的 3 维人体运动模型;Dockstader 等人^[70]则采用分层结构模型对人体运动进行分析;Han 等人^[37]根据 2 维人体形状数据采用最小二乘法拟合 3 维人体运动模型,从而获得运动参数的估计。

3.3.2 非模型的方法

非模型的方法是通过位置、速度、形状、色彩等相关特征的预测或估计来建立相邻帧间的关系,其中很多方法是基于人体形状的。Murase 与 Sakai^[71]提出了一种时空相关匹配的方法来分析步

态, Huang 等人^[72]进一步扩展了他们的工作, 通过采用 PCA 与 LDA(线性判决分析)的特征空间变换方法将高维特征映射到低维特征空间; Little 和 Boyd^[73]利用步态序列图像的光流频率和相位作为特征; Hayfron-Acquah 等人^[74]通过分析人体运动的对称性, 采用广义对称性算子对人体的轮廓图像和图像序列的光流信息分别进行对称映射从而获取步态特征; Foster 等人^[26]采用区域度量的方法将各种掩模图像与人体形状信息进行叠加产生用于识别的特征; BenAbdelkader 等人^[28]利用步态序列的自相似图来提取步态特征, 但是自相似图易受光照和噪声因素的影响; Kale 等人^[12]提取人体轮廓图像的宽度向量作为识别的特征; Shutler 等人^[75]引入速度矩(VMs)作为特征; Johnson 和 Bobick^[76]采用4维静态身体参数作为特征实现了多视角的步态识别; Lee 和 Elgammal^[10]采用双线性模型将步态模式与步态内容分离, 通过学习将个体的步态模式作为识别依据; Sarkar 等人^[9]直接利用提取的二元人体轮廓区域的相似性度量作为特征; Collins 等人^[11]使用关键帧分析对序列进行匹配; Shakhnarovich 等人^[77]利用 VH(visual hull)实现了虚拟的垂直或侧面视角下的人体影像的重建, 并以此作为识别特征; Wang 等人则提取轮廓点到人体质心的距离向量^[78]和 Procrustes 统计形状信息^[79]作为特征。

3.4 识别方法

在提取了步态特征之后, 就要将待测序列的特征与样本特征进行比对完成最终的识别任务。当前步态识别研究中采用的两个主要方法是模板匹配和统计方法。

3.4.1 模板匹配

模板匹配方法广泛应用于模式识别领域, 是一种基本的特征匹配方法。文献[78]中归一化欧氏距离度量和文献[79]中的统计形状信息分析体现的正是模板匹配的思想, Foster 等人^[26]的区域度量获取的特征进行比对时采用的也是类似的方法; Sarkar 等人^[9]对序列图像的相似性描述采用的是图像模板匹配; 此外, 文献[11]、[72]、[80]等也是基本的模板匹配方法。

模板匹配中另一类有效的方法是动态时间规整(DTW)。动态时间规整能够对存在全局或局部扩展、压缩或变形的模式进行匹配, 解决动态模式的相似度量和匹配问题。在步态识别中, 测试序列与样本序列的时间尺度一般不同, 而动态时间规整可较

好地完成这种情况下的匹配, 且具有简单易懂、算法鲁棒的优点。Kale 等人^[80]以人体轮廓的宽度向量作为特征, 采用 DTW 匹配待测序列与样本序列; Veeraraghavan 等人^[81]在基于形状的步态识别中也采用了 DTW。

3.4.2 统计方法

模板匹配实际是一种基于距离度量的方法, 在步态识别中使用这种方法就忽略了隐含在步态序列中的姿态之间的联接关系, 而隐马尔可夫模型(HMM)可以很好地融合这些信息。步态周期可以看作一个双重随机过程, 其中隐过程用姿态之间的转移来描述, 而显过程则用特定姿态下的图像特征刻画。在基于隐马尔可夫模型的步态识别中, 步态序列被看作是人体行走姿态在给定约束下的一种遍历关系。通过对样本库中每个目标调整模型参数 $\lambda = (\pi, A, B)$, 使得同一目标的测试序列的 $P(O|\lambda)$ 达到最大。文献[12]中使用半个步态周期的5个关键姿态的宽度向量作为特征, 通过计算给定图像与样本姿态的距离产生低维观测向量, 并以此训练 HMM 的参数进行步态识别; 文献[24]、[27]、[29]也都是基于 HMM 的步态识别文献。

除隐马尔可夫模型外, 步态识别中还有其他基于统计的方法。Bazin 和 Nixon^[82]对训练集建立了特征分布的类内和类间先验概率分布模型, 然后通过贝叶斯分类器实现个体的验证, 收到较好的效果。

4 研究难点与发展趋势

4.1 研究难点

当前步态识别的研究难点可分为以下几个方面:

(1) 运动分割

运动分割一直是计算机视觉领域的一个难题, 主要问题在于容易受到光照条件、噪声、阴影等的影响, 此外在前景目标与背景相似的情况下都使得准确的运动分割变得极具挑战性。对给定的步态图像序列, 首要的任务就是要准确地分割人体目标。在众多运动分割方法中, 当前主要采用的是背景减除法, 但是对于比较复杂的背景, 就需要建立自适应背景模型以实现准确的背景更新, 从而实现有效的运动分割。因此, 当前研究的一个难点就是复杂背景下性能满足实时需求的自适应背景建模问题。

(2) 遮挡处理

当前步态识别的研究主要集中在视觉区域中单人运动的情况,而这显然是不能满足实际应用要求的。在实际环境中当遮挡发生时,由于人体只有部分可见或者全都不可见,此时就不能从图像中分割出人体区域。因此,在发生遮挡时识别率在某种程度上都会有所降低。为了克服遮挡所带来的问题,需要发掘人体的运动特征,建立良好的运动估计模型,同时多摄像机的使用对此也会带来很大帮助。

(3) 性能评估

鉴于缺乏通用的步态数据库及其规模限制,当前对识别算法性能的研究也只是处于起步阶段。纵观步态研究现状,采用的数据库规模最大的还不到200个,并且背景比较简单,基本上没有涉及到复杂背景下(例如人群中)个体的识别,这就使得我们对步态作为生物特征识别技术的识别能力无法做出一个准确的评价。

4.2 发展趋势

结合当前研究的现状和难点分析,可以对步态识别的发展趋势概括如下:

(1) 3维建模与多摄像机的使用

通过对人体结构或人体运动进行3维建模,可以更加准确地刻画待识目标的静态和动态特征,从而有助于更加复杂的特征匹配、运动估计算法的实现。通过多摄像机的使用,一方面解决了当前研究主要是侧面视角的局限性,另一方面也有助于遮挡情况下的特征提取。为达到实用目的,复杂背景下特定目标的跟踪与识别也使得多摄像机的使用成为研究趋势所在。

(2) 数据融合

数据融合的核心思想是对同一事物的不同信息进行比较分析,根据多数原则进行信息的筛选,最终得出对事物有用的信息成分。数据融合在其他生物特征识别领域已经取得了很好的效果^[83,84],并且研究人员已经展开了数据融合在步态识别中的研究,文献[82]将提取的静态与动态步态特征融合之后实现了性能的提升。随着对步态识别中数据融合技术更深入的研究,通过采用不同层次(数据层次、特征层次、决策层次)的各种融合规则,数据融合必将带来步态识别性能的提升。此外,针对单一生物特征各自固有的缺陷,通过融合其他生物特征,优势互补,可以实现性能稳定的多模态生物特征识别系统,最大限度地应用到各种智能监控场合。值得期待的

是研究人员开展了相关的研究,文献[5]、[77]中研究了步态和人脸的融合。

(3) 复杂背景下大规模步态数据库的建立

数据库的规模局限使得当前的研究成果不具有绝对说服力,因此必须在更大规模、更加复杂背景环境下进一步检验步态的识别性能。复杂背景下大规模步态数据库的建立与性能测试是真实场景下进行步态识别的基础,是步态作为生物特征用于识别目的的必经之路。

5 结 语

作为生物特征识别领域的一个新的研究方向,步态识别已经引起了广大科研工作者的浓厚研究兴趣。通过不懈的努力,研究人员已经向我们展示了步态识别性能及潜力,并且正在朝实用化的方向逐步迈进。结合当前步态研究的现状,本文从步态识别的运动检测、周期检测、特征提取、识别算法方面分别回顾了相关研究成果,并对研究难点与发展趋势进行了总结与概括。

参考文献 (References)

- 1 Nixon M S, Carter J N, Nash J M, et al. Automatic Gait Recognition [A]. In: Proceedings of the IEEE Colloquium on Motion Analysis and Tracking[C], London, England, 1999: 1~6.
- 2 Murray M P, Drought A B, Kory R C. Walking patterns of normal men[J]. Journal of Bone and Joint Surgery, 1964, 46-A(2): 335~360.
- 3 Murray M P. Gait as a total pattern of movement[J]. American Journal of Physical Medicine, 1967, 46(1): 290~332.
- 4 Johansson G. Visual perception of biological motion and a model for its analysis [J]. Perception and Psychophysics, 1973, 14(2): 201~211.
- 5 Kale A, Roychowdhury A K, Chellappa R. Fusion of gait and face for human identification [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Montreal, Que, Canada, 2004: 901~904.
- 6 Kozlowski L T, Cutting J E. Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display [J]. Perception and Psychophysics, 1977, 21: 575~580.
- 7 BenAbdelkader C, Cutler R G, Davis L S. Gait recognition using image self-similarity [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004, 2004(4): 572~585.
- 8 Niyogi S, Adelson E. Analyzing and recognizing walking figures in XYT[A]. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Seattle, WA, USA, 1994: 469~474.

- 9 Sarkar S, Phillips P J, Liu Zongyi, *et al.* The gumanID gait challenge problem: data sets, performance, and analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 162 ~ 177.
- 10 Lee Chan-su, Elgammal A. Gait style and gait content: bilinear models for gait recognition using gait re-sampling [A]. In: Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Seoul, South Korea, 2004: 147 ~ 152.
- 11 Collins R T, Gross R, Shi Jianbo. Silhouette-based human identification from body shape and gait [A]. In: Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition [C], Washington, DC, USA, 2002: 366 ~ 371.
- 12 Kale A, Rajagopalan A, Cuntoor N, *et al.* Gait based recognition of humans using continuous hmms [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Washington, DC, USA, 2002: 336 ~ 341.
- 13 Chester V L, Biden E N, Tingley M. Gait analysis [J]. Biomedical Instrumentation and Technology, 2005, 39(1): 64 ~ 74.
- 14 Salarian A, Russamann H, Vingerhoets F J G, *et al.* Gait assessment in parkinson's disease: toward an ambulatory system for long-term monitoring [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(8): 1434 ~ 1443.
- 15 Mariunas M, Trimonis T. Research of the influence of deformations and errors of prostheses on the disabled human's gait [A]. In: Proceedings of the Second IASTED International Conference on Biomechanics [C], Honolulu, HI, USA, 2004: 5 ~ 9.
- 16 Nixon M S, Carter J N. Advances in automatic gait recognition [A]. In: Proceedings of Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Seoul, South Korea, 2004: 139 ~ 144.
- 17 Boyd J E, Little J J. Biometric gait recognition [R]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 3161: 19 ~ 42.
- 18 Ye Bo, Wen Yumei. Survey of gait-based human identity recognition techniques [J]. Computer Applications, 2005, 25(11): 2577 ~ 2580. [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.]
- 19 Tian Guangjian, Zhao Rongchun. Survey of gait recognition [J]. Application Research of Computers, 2005, 22(5): 20 ~ 22. [田光见, 赵荣椿. 步态识别综述 [J]. 计算机应用研究, 2005, 22(5): 20 ~ 22.]
- 20 Liu Zongyi, Malave L, Osuntoqun A. Towards understanding the limits of gait recognition [A]. In: Proceedings of SPIE Biometric Technology for Human Identification [C], Orlando, FL, United States, 2004: 195 ~ 205.
- 21 Beqq R, Kamruzzaman J. A machine learning approach for automated recognition of movement patterns using basic, kinetic and kinematic gait data [J]. Journal of Biomechanics, 2005, 38(3): 401 ~ 408.
- 22 Begg R K, Palaniswami M, Owen B. Support vector machines for automated gait classification [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2005, 52(5): 828 ~ 838.
- 23 Sukwon K, Thurmon L, Yoon H Y. Relationship between age-related gait adaptations and required coefficient of friction [J]. Safety Science, 2005, 43(7): 425 ~ 436.
- 24 Liu Zongyi, Sarkar S. Effect of silhouette quality on hard problems in gait recognition [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2005, 35(2): 170 ~ 183.
- 25 Tolliver D, Collins R T. Gait shape estimation for identification [A]. In: Proceedings of the 4th International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication [C], Guildford, UK, 2003: 734 ~ 742.
- 26 Foster J F, Nixon M S, Prugel-Bennett A. Automatic gait recognition using area-based metrics [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(14): 2489 ~ 2497.
- 27 Lee L, Dalley G, Tieu K. Learning pedestrian models for silhouette refinement [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision [C], Nice, France, 2003: 663 ~ 670.
- 28 BenAbdelkader C, Cutler R G, Davis L S. Motion-based recognition of people in eigenGait space [A]. In: Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Washington, DC, USA, 2002: 267 ~ 272.
- 29 Kale A, Sundaresan A, Rajagopalan A N, *et al.* Identification of humans using gait [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1163 ~ 1173.
- 30 Zhang Zonghua, Troje N F. View-independent person identification from human gait [J]. Neurocomputing, 2005, 69(1-3): 250 ~ 256.
- 31 Lee C S, Elgammal A. Towards scalable view-invariant gait recognition: multilinear analysis for gait [A]. In: Proceedings of the 5th International Conference on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication [C], Hilton Rye Town, NY, United States, 2005, 3546: 395 ~ 405.
- 32 Chow D H K, Kwok M L Y, Au-Yang A C K, *et al.* The effect of backpack load on the gait of normal adolescent girls [J]. Ergonomics, 2005, 48(6): 642 ~ 656.
- 33 Lay A N, Hass C J, Smith D W. Characterization of a system for studying human gait during slope walking [J]. Journal of Applied Biomechanics, 2005, 21(2): 153 ~ 166.
- 34 Lin Chien-ju, Wang Lin-hwa, Su Fong-chin. Gait analysis of slope lateral walking: a preliminary study [J]. Journal of Medical and Biological Engineering, 2004, 24(4): 189 ~ 194.
- 35 Yoshino K, Motoshiqe T, Araki T, *et al.* Effect of prolonged free-walking fatigue on gait and physiological rhythm [J]. Journal of Biomechanics, 2004, 37(8): 1271 ~ 1280.
- 36 Tanawonqsuan R, Bobick A. Modelling the effects of walking speed on appearance-based gait recognition [A]. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington, DC, United States, 2004, 2: 783 ~ 790.
- 37 Han J, Bhanu B. Performance prediction for individual recognition by gait [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(5): 615 ~ 624.
- 38 Cavrila D M. The visual analysis of human movement: a survey [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(1): 82 ~ 98.

- 39 Moeslund T B, Granum E. A survey of computer vision-based human motion capture [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, **81**(3): 231 ~ 268.
- 40 Wang Liang, Hu Weiming, Tan Tieniu. Recent developments in human motion analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **36**(3): 585 ~ 601.
- 41 Song Yang, Feng Xiaolin, Perona P. Towards detection of human motion [A]. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Hilton Head Island, SC, USA, 2000, **1**: 810 ~ 817.
- 42 Zhong Qing. Researches of Motion Detection in Intelligent Video Surveillance [D]. Hefei: Chinese Scientific and Technical University, 2004. [钟庆. 智能视频监控中的运动检测算法研究 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2004.]
- 43 Yuan D, Lu Siwei. Motion detection and tracking system based on frame analysis and simulated static electric field (SSEF) snake [A]. In: *Proceedings of 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision [C]*, Kunming, China, 2004, **3**: 2308 ~ 2313.
- 44 Blake A, Isard M. *Active Contours [M]*. Berlin: Springer, 1998.
- 45 Shi Li, Zhang Zhao-yang. Extraction of video object plane using modified Hausdorff object tracker [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, **6**(7): 689 ~ 692. [史立, 张兆扬. 使用修改的豪氏道夫距离自动提取运动对象 [J]. *中国图象图形学报*, 2001, **6**(7): 689 ~ 692.]
- 46 Park S C, Lee S W. Object tracking with probabilistic hausdorff distance matching [A]. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent Computing [C]*, Hefei, China, 2005, **3644**: 233 ~ 242.
- 47 Lipton A J, Fujiyoshi H, Patil R S. Moving target classification and tracking from real-time video [A]. In: *Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision [C]*, Princeton, NJ, USA, 1998: 8 ~ 14.
- 48 Collins R T, Lipton A J, Kanade T, *et al.* A System for Video Surveillance and Monitoring: Vsam Final Report [R]. TR CMU-RI-TR -00-12, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2000.
- 49 Chang C C, Chia T L, Yang C K. Modified temporal difference method for change detection [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(2): 1 ~ 10.
- 50 Guo Jing, Chng E S, Rajan D. Foreground motion detection by difference-based spatial temporal entropy image [A]. In: *TENCON 2004 [C]*, Chiang Mai, Thailand, China, 2004, **1**: 379 ~ 382.
- 51 Wren C R, Azarbayejani A, Darrell T, *et al.* Pfinder: Real-Time tracking of the human body [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, **19**(7): 780 ~ 785.
- 52 Friedman N, Russell S. Image segmentation in video sequences: a probabilistic approach [A]. In: *Proceedings of the 13th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence [C]*, Rhode Island, USA, 1997: 175 ~ 181.
- 53 Stauffer C, Grimson WEL. Adaptive background mixture models for real-time tracking [A]. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Fort Collins, CO, USA, 1999, **2**: 246 ~ 252.
- 54 Magee D R. Tracking multiple vehicle using foreground, background and motion models [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, **22**(2): 143 ~ 155.
- 55 Javed O, Shafique K, Shah M. A hierarchical approach to robust background subtraction using color and gradient information [A]. In: *Proceedings Workshop on Motion and Video Computing (MOTION 2002) [C]*, Orlando, FL, USA, 2002: 22 ~ 27.
- 56 Elgammal A, Duraiswami R, Harwood D, *et al.* Background and foreground modeling using nonparametric kernel density estimation for visual surveillance [J]. *Proceedings of IEEE*, 2002, **90**(7): 1151 ~ 1163.
- 57 Kruger V, Anderson J, Prehn T. Probabilistic model-based background subtraction [A]. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Image Analysis and Processing [C]*, Cagliari, Italy, 2005, **3617**: 180 ~ 187.
- 58 Sidenbladh H. Detecting human motion with support vector machines [A]. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition [C]*, Cambridge, MA, UK, 2004: 188 ~ 191.
- 59 Ishiyama H, Okatani T, Dequchi K. High-speed and high-precision optical flow detection for real-time motion segmentation [A]. In: *Proceedings of the SICE Annual Conference [C]*, Sapporo, Japan, 2004: 751 ~ 754.
- 60 Wu Youfu, Shen Jun. Motion detection and trajectory analysis [A]. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Virtual Reality and its Applications in Industry [C]*, Tianjin, China, 2004, **5444**(1): 130 ~ 137.
- 61 Nagano T, Hirahara M, Urushihara W. A general model for visual motion detection [J]. *Biological Cybernetics*, 2004, **91**(2): 99 ~ 103.
- 62 Cutler R, Davis L. Robust real-time periodic motion detection, analysis, and applications [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(8): 781 ~ 796.
- 63 BenAbdelkader C, Cutler R G, Davis L S. Stride and cadence as a biometric in automatic person identification and verification [A]. In: *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition [C]*, Washington, DC, USA, 2002: 372 ~ 377.
- 64 Wagg D K, Nixon M S. On automated model-based extraction and analysis of gait [A]. In: *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Seoul, South Korea, 2004: 11 ~ 16.
- 65 Lee L, Grimson W E L. Gait analysis for recognition and classification [A]. In: *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition [C]*, Washington, DC, USA, 2002: 155 ~ 162.
- 66 Cunado D, Nixon M S, Carter J. Using gait as a biometric, via phase-weighted magnitude spectra [A]. In: *Proceedings of International Conference on Audio and Video-based Biometric Person*

- Authentication[C], Crans-Montana, Switzerland, 1997: 95 ~ 102.
- 67 Yoo J H, Nixon M S. Markerless human gait analysis via image sequences [A]. In: Proceedings of International Society of Biomechanics XIXth Congress[C], Dunedin, NZ, 2003.
- 68 Yam C Y, Nixon M S, Carter J N. Automated person recognition by walking and running via model-based approaches [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(5): 1057 ~ 1072.
- 69 Urtasun R, Fua P. 3D Tracking for gait characterization and recognition[A]. In: Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition[C], Seoul, Korea, 2004: 17 ~ 22.
- 70 Dockstader S L, Berq M J, Tekalp A M. Stochastic kinematic modeling and feature extraction for gait analysis [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 962 ~ 976.
- 71 Murase H, Sakai R. Moving object recognition in eigenspace representation: gait analysis and lip reading[J]. Pattern Recognition Letters, 1996, 17(2): 155 ~ 162.
- 72 Huang P S, Harris C J, Nixon M S. Recognizing humans by gait via parametric canonical space [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1999, 13(4): 359 ~ 366.
- 73 Little J J, Boyd J E. Recognizing people by their gait: the shape of motion[J]. Journal of Computer Vision Research, Videre, 1998, 1(2): 1 ~ 33.
- 74 Hayfron-Acquah J B, Nixon M S, Cater J N. Automatic gait recognition by symmetry analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(13): 2175 ~ 2183.
- 75 Shutler J, Nixon M S, Harris C. Statistical gait recognition via velocity moments[A]. In: Proceedings of IEE Colloquium on Visual Biometrics[C], London, UK, 2000, 10: 1 ~ 5.
- 76 Johnson A Y, Bobick A F. A multi-view method for gait recognition using static body parameters [A]. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication[C], Halmstad, Sweden, 2001: 301 ~ 311.
- 77 Shakhnarovich G, Lee L, Darrell T. Integrated face and gait recognition from multiple views[A]. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C], Kauai, HI, USA, 2001, 1: 439 ~ 446.
- 78 Wang Liang, Tan Tieniu, Ning Huazhong, et al. Silhouette analysis-based gait recognition for human identification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1505 ~ 1518.
- 79 Wang Liang, Tan Tieniu, Hu Weiming, et al. Automatic gait recognition based on statistical shape analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(9): 1120 ~ 1131.
- 80 Kale A, Cuntoor N, Yegnanarayana B, et al. Gait analysis for human identification [A]. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication[C], Guildford, UK, 2003: 706 ~ 714.
- 81 Veeraghavan A, Chowdhury A R, Chellappa R. Role of shape and kinematics in human movement analysis[A]. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington, DC, USA, 2004, 1: 730 ~ 737.
- 82 Bazin A I, Nixon M S. Probabilistic combination of static and dynamic gait features for verification [A]. In: Proceedings of Biometric Technology for Human Identification II, SPIE Defense and Security Symposium[C], Orlando, FL, United States, 2005, 5579: 23 ~ 30.
- 83 Wang Jianguang, Toh K A, Venkateswarlu R. Fusion of appearance and depth information for face recognition [A]. In: Proceedings of the 5th International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication [C], Hilton Rye Town, NY, USA, 2005: 919 ~ 928.
- 84 Marcialis G L, Roli F. Fusion of multiple fingerprint matchers by single-layer perceptron with class-separation loss function[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(12): 1830 ~ 1839.