

步态识别问题的特点及研究现状

赵黎丽 侯正信

(天津大学电信学院, 天津 300072)

摘 要 步态识别作为一种较新的生物认证技术有其独特优势, 在计算机视觉研究领域又是一个难题。本文首先分析了步态识别问题的这两个特点。其次, 按一个模式识别系统所涉及的 4 个问题域: 传感器的选择、预处理技术、表达方法、决策模型为索引去分析步态识别问题。在表达方法一节中将文献中所反映的研究方法从计算机视觉的角度分为基于模型和基于整体的两大类, 并对每类方法进行了举例说明, 指出了所举出的方法的优缺点和其提取步态模式中的结构成分信息和运动特征信息时所采用的方法。再次, 对步态识别算法性能评价标准和可得到的数据库进行了分析说明。最后得出了目前步态识别问题研究中的几个薄弱点, 指出进一步研究此问题的发展空间。

关键词 步态识别 生物认证技术 计算机视觉 时空模式表达 结构成分信息 运动特征信息

中图法分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)02-0151-11

Characteristics of Gait Recognition Problem and A Review of its Research

ZHAO Li-li, HOU Zheng-xin

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract As a new technology of biometrics, gait recognition has its predominance among other biometric technologies while in computer vision research field it is a hard problem. Those two characteristics are analyzed at first. Then, the gait recognition problem is expounded in four aspects which are essentially involved in designing a pattern recognition system: the choice of sensors, preprocessing technique, data representation scheme, and decision making model. The emphases are in the section concerning gait data representation, in which approaches to the gait recognition problem from the point of view of computer vision are broadly classified as being either model-based or holistic. Every class is illustrated in detail, and the merits and defects of each example are pointed out. The information of structure component and the information of the motion dynamics of the body extracted in those approaches are also explained. Thirdly, the performance evaluation standard and available database are discussed. At last, a few weaknesses in the gait recognition research field are proposed, and future areas of research are also put forward.

Keywords gait recognition, biometrics, computer vision, spatio-temporal pattern representation, structure component information, body dynamics information

1 步态识别问题的特点

步态识别是近年来为越来越多的研究者所关注的一种较新的生物认证技术^[1], 它是通过人的走路方式来识别人的身份。

早期的医学研究^[2,3]表明: 人的步态中有 24 种不同的成分, 如果把这 24 种成分都考虑到, 则步态是为个体所特有的。在 Johansson 早期的物理心理学实验^[4]中, 受试者能够仅仅通过观察附着在运动中人的几个关节上的灯泡的运动轨迹 (MLD, moving light displays) 识别运动的类型。后来的实验表明:

收稿日期: 2005-02-23; 改回日期: 2005-06-27

第一作者简介: 赵黎丽 (1975 ~), 女。现为天津大学信号与信息处理专业博士研究生。主要研究方向为数字图像分析和处理等。

E-mail: llzhao97@hotmail.com

熟人的身份^[5]、人的性别^[4]都能够通过这种 MLD 实验识别出来。近年来,步态分析这一跨学科领域的研究成果进一步说明了在步态视频序列中含有人身份信息。从生物力学的角度来看,人的步态包含身体上百种肌肉和关节的综合运动。这些运动对所有的人来说都遵从基本的双足模式,然而不同的人其运动又有差异,例如相对时序和幅度的不同。这些差异是整个肌肉和骨架(身体的重量、肢体的长度、骨骼的结构)的函数。因为结构难以复制,所以步态被认为是个体特有的,且完全决定于几百个运动学参数。这些运动学参数包括特定关节的角速度、加速度以及肢体的边界^[3,6]等。以上领域的研究是步态识别作为一种生物认证技术的科学依据。

在应用领域,类似于人脸识别,它要解决识别和校验两类问题^[7]。在识别问题中,给出未知身份人的步态,在数据库中搜寻与之匹配的人的步态,从而确认人的身份;在校验问题中,需要步态识别算法对已假定的某人的身份作出判定,即接受或拒绝所假定的身份。步态识别作为一种生物认证技术,具有其他生物认证技术所不具有的独特优势,即在远距离或低视频质量情况下的识别潜力^[8],且步态难以隐藏或伪装等。例如,目前人脸识别技术受限于视频质量和拍摄角度;指纹、虹膜等生物认证技术要求近距离或接触性的感知(如指纹需要接触指纹扫描仪等)。在黑夜中,步态识别能更大地发挥其作用。一个可能提出的问题是,如果步态数据库非常大,步态信息并不足以鉴别每一个个体。即使如此,步态仍能作为一种索引工具去缩小可能目标的搜索范围,如对嫌疑犯的排除。

在计算机视觉领域,步态识别是指在视频序列中自动提取表征人步行特征的视觉线索以达到鉴别人的身份的目的。然而,医学研究所确定的特征,或者因为特征本身没有可重复性,或者由于观察角度的限制和自遮挡问题,并不适于基于计算机视觉的系统去提取。目前还只限于从真实的视频序列中提取基于臀部和膝盖的转动模式。从医学的角度来看,这些模式决定了个体之内的一致性和个体之间的变化性^[9]。从计算的角度来看,从低质量和没有标记的视频序列中对运动物体进行跟踪和分割的算法的不精确性引入了所提取特征的不可靠性,而由摄像机深度和角度的不同引入的透视的影响使特征提取过程变得十分繁重^[10]。在人体模型所表达的特征不足以表现人的步态的情况下,产生了另外一

大类基于整体的方法,即用统计方法从步行者的图像序列中表征这种时空模式。它们或者是提取未经任何转化的表达这种时空模式的数据(即二进制或彩色的剪影时间序列或者光流图像序列),或将这些数据映射为一个更为简洁的 1 维或 2 维信号^[11]。基于整体的方法对视角及外形的变化没有鲁棒性,且不能处理遮挡问题(人行走时有自遮挡现象,并且人的走路姿态会被提箱、伞、背包挡住)。对步态识别方法的探索涉及计算机视觉领域里的许多难题,例如人的运动的动力学建模和描述、自动背景去除、时域信号的匹配等^[12]。步态识别问题是人的运动分析的一个子问题^[13],因而步态识别问题的研究成果有可能扩展应用于解决计算机视觉领域里的其他问题,如区分不同的运动^[10](区分走路、跑步、打网球的击球动作),手语的解释^[14,15]等。而相关领域的研究成果也有可能应用于步态识别,如周期性运动分析的研究成果^[16]有可能应用于步态识别^[17]。另外统计形状分析的成果也在步态识别问题中得到了很好的应用^[12]。因此步态识别问题是可以吸收其他相关研究领域研究成果的一个开放的问题。

如同在文献[7]中所指出的:影响人脸识别快速发展的因素为众多的研究者和研究团体的参与研究、可得到的大型人脸图像数据库以及有用于评价人脸识别算法性能评价标准。步态识别问题同样受以上因素影响。同时,解决步态识别问题的过程是一个进行模式分类的过程,为了更清楚地说明问题,本文按照一般模式分类的步骤^[18-20]进行论述,并对步态识别算法性能评价标准和可得到的数据库进行说明。

2 传感器的选择

在步态识别技术的应用中,一般采用消费级 DV(如 NIST/USF 的数据库^[21],MIT 数据库^[22])、专业摄像机(CMU 数据库^[23])或监控摄像机(UM 数据库^[24])进行图像序列的获取。对红外序列步态识别的研究还比较少,目前只是对红外图像序列进行运动分析^[25]。为了充分发掘步态数据里的身份信息,Tanawongsuwan 等研究者将用于运动捕捉的电磁传感器穿着在试验者不同的身体部位,将关节角度的轨迹投影到步行平面以恢复臀部和膝盖部的角度(认为这些角度数据相对于直接从视频图像序列

中恢复所得更为准确),以此作为识别的特征^[26]。

3 预处理技术

预处理采用何种图像处理技术取决于识别算法想要提取的特征是什么。基于整体的特征提取方法的图像预处理一般是先得到人的剪影,因为在现有的数据库中图像背景都不太复杂,且只有一个人行走,摄像机静止。在这样的前提下其预处理步骤由以下几部分组成^[27]:进行对人的跟踪和背景去除^[28,29];定位感兴趣的区域;平滑剪影去掉空洞,减小由非目标物体所带来的噪声。模式识别要求特征对于一定程度的移动、转动、放大缩小具有不变性^[20],因此还要对剪影进行归一化。另外,许多步态识别算法都要对步态周期进行检测。对于数据库中较复杂的自然环境,得到干净剪影的困难在于^[27]:背景有运动物体;由天气造成的光线变化;风吹树的运动;人相对于摄像机的深度变化使摄像机不断地自动聚焦等。Lee等人^[30]提出了一种专门用于步态识别问题的精练剪影的方法。剪影提取的质量、所提取的特征以及所采用的识别方法与识别效果之间的关系是一个较深入的问题。目前的步态识别算法大多是基于剪影的。对于基于模型的步态特征提取方法的图像预处理,如在将人的下肢建模为两个相连接的钟摆,而步态则被认为是这些钟摆的周期性运动的方法的预处理中,因为只提取人步行的局部特征,则预处理的工作相对少一些,如可能只用边缘算子去产生边缘图像或用 Hough 变换产生线图像^[9]。而如要得到人的步态所反映的图像中身体的高度、头部和盆骨之间的距离、盆骨到左脚和右脚的最大距离、左脚与右脚之间的最大距离等静态参数还是需要先提取剪影,进而消除透视角度的影响而得到步态的特征矢量。并不能将两种模式表达类别所涉及的预处理技术截然区别开。

4 表达方法

解决步态识别问题应着眼于对产生步态的物理过程有深入的了解,才有可能得到显著的突出的特征。研究者已从医学、机器视觉理论上找依据去提取有力的步态特征。从模式识别的理论上说,一般地,模式是特征的一种数据结构,它包括有关特征的名称和一个或多个特征数值信息,还可能包括含

的或者隐含的关于特征间的关系信息^[31]。模式表达的维数应越少越好,这是由测量的耗费和分类的准确性决定的。少量的突出的特征既能简化模式表达,还能简化建立在表达之上的分类器;而另一方面,特征数量的减少有可能导致鉴别力的损失进而降低识别性能的准确性。为了寻找适当的特征集,步态识别问题中寻求模式表达方法的过程就包括了从原始图像中提取特征,这涉及到了图像处理技术和计算机视觉技术。它还包括:如果特征的维数太大,则采用主分量分析(PCA)进行降维和特征提取,以及有时需要用 ANOVA 方法(变异数分析方法)进行特征选择以选出突出的特征,这涉及到了统计模式识别中的特征提取投影和特征选择方法。采用何种统计模式识别方法取决于从图像中提取的特征的性质。目前的步态的表达方法侧重于从图像处理和机器视觉的角度去寻找和精确提取有效反映步态的特征,对统计模式识别的方法的应用不太深入。

对于步态识别问题从机器视觉的角度来分类可大致分为基于模型的和基于整体的方法。这两种方法都遵从一致的特征提取、特征匹配和高层次处理的框架。其主要的区别是在相邻两帧之间的特征匹配上。基于模型的方法假定一个先验模型将2维图像序列和模型数据相匹配。一旦图像和模型数据的匹配已经达到,特征的对应就达到了。基于模型的方法考察人体的结构;而基于整体的方法通过对位置、速度、形状等特征的估计在相邻帧之间建立对应关系,是对人体的运动模式的紧凑的表达,而不考虑在这之下的人体结构。如果对步态进行仔细地分析不难发现其有两种比较重要的成分:其一是结构成分,它反映一个人的物理体形,比如身体的尺度和肢体的长度;其二是身体在一个步态周期内的运动的特征。

4.1 基于模型的方法

在早期的基于人体模型的方法中把步行看成是一个具有相关频率范围的周期信号,并利用了步态信号的周期性本质。步态信号是由大腿方向角的变化得到的^[32],在10人的数据库上做试验,得到了90%的识别率。Cunado和Nixon等人^[9,33]在文献[32]的基础上提出的一种基于模型的特征提取分析方法,称为VHT(velocity hough transform)。VHT方法应用了图像序列之间的时间相关性(这种时间相关性通常被用在视频压缩技术里)来提取线性运动的锥体的最优参数。它弥补了文献[32]中的不

足,能够从图像序列中自动提取由大腿方向角的变化所产生的步态信号。其优点是可以得到遮挡时刻的步态参数,对噪声也有一定的鲁棒性,而且通过简单扩展就能提取任何形状和任何运动的模型参数。这一系列方法并没有反映步态中的结构成分,而只反映了其运动特征。

Lee 等人^[22]提出了一种基于步态外形的表达方法。总的来说这一方法是受运动分析中人的 2 维轮廓模型的启发而产生的。按照人体比例,剪影被分为 7 个区域:头肩、躯干前部分、躯干后部分、前大腿、后大腿、前小腿、后小腿。每个区域用一个椭圆去逼近它。在每个区域所提取的特征为椭圆的中心坐标 (\bar{x}, \bar{y}) 、椭圆长轴和短轴的比例 b 以及椭圆长轴的方向角 α 。对于每一图像帧,7 个区域共有 28 个特征值,另外加上整个剪影质心高度特征 h ,用以描述躯干和腿的比例。为了表达区域特征随时间的变化,采用了以下两种方法:一是计算区域特征随时间变化的均值和标准差;二是计算每一区域特征傅里叶变换的幅值和相位。

若 r_1, r_2, \dots, r_7 代表每一帧中人体的 7 个区域,则区域特征矢量为

$$f(r_i) = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, b_i, \alpha_i), i = 1, \dots, 7$$

第 i 帧特征矢量为

$$F_j = (f(r_1), \dots, f(r_7))$$

对于一个序列 S ,步态的平均外形特征矢量为

$$S = (\text{mean}(h_j), \text{mean}(F_j), \text{std}(F_j))$$

其中, $j = 1, \dots, \text{last}$, $\text{mean}()$ 为计算算术平均值的函数, $\text{std}()$ 为计算标准方差的函数。 S 总共有 57 维。对于一个序列 S ,步态的频谱成分特征矢量表示为

$$t = (\Omega_d | X_i(\Omega_d) |, \text{phase}(X_i(\Omega_d)))$$

其中, $X_i = \text{FourierTransform}(F_{j=1, \dots, \text{last}}(f(r_i)))$

这里, phase 是傅里叶变换后的相位函数, $\text{FourierTransform}()$ 是离散傅里叶变换, Ω_d 为主步行频率(d 指 dominant), 即傅里叶变换中所占比例最大的那一频率成分。

这两种特征矢量经 ANOVA 方法降维后作为用于识别的特征矢量。同时发现经 ANOVA 方法可得出用于性别分类的 6 个重要的区域特征。因为所提取的特征是系统性的, 所以该方法对剪影中的噪声有一定的鲁棒性。因为噪声像素的数目相对较小, 不会引起系统性的偏差。其缺点是, 特征提取是基于外形的, 因而受衣服形状变化的影响比较大。且仅限于在正侧面视角(frontal-parallel)下识别。这里

的平均外形特征矢量反映了步态的结构成分。而每个区域所提取的特征采用了基于区域的形状表示方法。这里的形状信息因为对每个区域进行提取, 因而形状反映得比较细致。频谱成分特征矢量反映了步态的运动特征。

Johnson 和 Bobick^[34, 35]提出了一种不依赖于角度的步态识别算法。这是一种基于恢复静态身体参数的方法。由运动决定的 4 个静态参数为 d_1 (剪影的高度)、 d_2 (图像中头部和盆骨之间的距离)、 d_3 (图像中盆骨到左脚和右脚的最大距离)和 d_4 (图像中左脚与右脚之间的最大距离)。这些距离组成了一个 4 维矢量 $W = q[d_1, d_2, d_3, d_4]$ 。以此作为特征矢量。这 4 个参数虽然是静态参数, 但却是由运动产生的, 所以特征矢量同时反映了步态的两种成分。

BenAbdelkader 等人在文献[36]中提出了一种基于步态时空参数的识别方法。把真实的跨步长度和频度作为识别的特征, 认为跨步长度和频度是身高、体重和性别的函数。这种方法需要标定摄像机, 对于光线变化、衣服形状变化和跟踪误差具有鲁棒性。

4.2 基于整体的方法

Niyogi 等人^[37]提出了一种最早的步态识别算法, 在时空维里, 头部和腿部有不同的运动模式。处理这些模式能得到身体运动的边缘, 进而建立立体的一个由五部分组成的“棍形”模型。图像上所反映的左右腿的角度信号就是由这一模型得到的。最后采用线性内插得出相对于行人轮廓高度和步行速度作归一化后的步态特征矢量。这种方法被应用于, 在同一天不同时间得到的 5 人、26 个序列的数据库中。依赖于欧氏距离矩阵中的权重因子, 识别率从近 60% 到稍过 80%。这种方法并没有使用轮廓数据的上肢信息, 且仅限于在正侧面视角下识别。但方法的优点是能很好地处理遮挡问题。这里只反映了步态的运动特征。

Sarkar 等人提出了步态识别的基线算法^[38]。首先半自动地跟踪行人, 其次提取剪影, 然后进行步态周期的探测, 最后将整个探测序列分为 K 个子序列, 每个子序列的长度为所探测到的步态周期的长度。利用模板匹配的方法, 在档案集中移位地比较子序列长度的档案集和探测集相应剪影帧之间的距离, 最后得到档案集和探测集剪影之间的相似度。即若探测集和档案集剪影序列分别表示为

$$S_p = \{S_p(1), \dots, S_p(M)\} \text{ 和 } S_c = \{S_c(1), \dots, S_c(N)\}$$

其中,下角 P 表示 probe set(探测集);G 表示 gallery set(档案基集)。且一个步态周期内帧的数目是 N_{Gait} ,则 probe set 中第 k 个子序列表示为

$$S_{pk} = \{S_p(k+1), \dots, S_p(k+N_{\text{Gait}})\}。$$

若 $\text{Num}(S)$ 表示剪影 S 中前景像素数目,则帧间相似度表示为

$$\text{FrameSim}(S_p(i), S_g(j)) = \frac{\text{Num}(S_p(i) \cap S_g(j))}{\text{Num}(S_p(i) \cup S_g(j))};$$

S_{pk} 和 S_g 之间的相关系数为

$$\text{Corr}(S_{pk}, S_g)(l) = \sum_{j=1}^{N_{\text{Gait}}} \text{FrameSim}(S_p(k+j), S_g(l+j));$$

其中, l 表示 gallery set 中的第 l 个子序列。 S_p 和 S_g 之间的相似度为

$$\text{sim}(S_p, S_g) = \text{Median}_l(\max_i \text{Corr}(S_{pk}, S_g)(l))。$$

其中, $\text{Median}()$ 为计算中值的函数。

基线算法利用了步态的时空相关性,实现起来十分简单,且文献[38]中用这一算法讨论了角度、鞋、路面、提箱以及时间对步态的影响。这是基于序列中静止姿态的匹配,剪影的直接模板匹配反映了比较粗糙的形状信息,而且对步态的运动信息几乎没有提取。

Wang 等人^[39]提出了一种简单有效的基于运动轮廓的识别算法。对于每个序列,用改进的背景去除方法检测步行者的运动轮廓,这些时变的 2D 轮廓被转化为对应的 1D 距离信号,同时通过特征空间变换来提取低维步态特征。Wang 等人^[12]提出的第 2 种方法是基于 Procrustes 形状分析的。其主要思想是应用统计形状分析提取步态的特征矢量。对于每一个剪影序列,用轮廓上的点所组成的一系列复矢量表示剪影轮廓随时间的变化,然后用 Procrustes 形状分析法得到平均形状以作为步态信号。Wang 等人在文献[40]中采用了步态形状信息和身体运动信息融合的方法。先使用 Procrustes 形状分析得到形状特征矢量,然后对人体进行建模和跟踪并恢复下肢关节角度轨迹,最后选择归一化的左右臀部和左右膝盖部的角度信号作为身体的运动特征矢量。最终的识别结果融合了两种信息的识别结果。由于形状特征和身体运动特征本质上是无关的,这使得两种信息的融合有很好的识别性能。概括地说,文献[12]、[39]、[40]的研究线索是从基于轮廓的形状表达出发,应用统计分析理论提取步态的形状信息,后来又有效地引入了基于人体模型的方法以提取步态的身体运动特征。方法的优点是

基于轮廓的形状表达减小了计算量,基于整体和基于模型两种方法有其融合优势。缺点是方法对视角变化敏感。文献[12]和文献[39]分别应用统计形状分析和点分布模型对形状进行了有力的描述。文献[40]中又加入了基于模型的方法来得到步态的运动特征。这是基于模型和基于整体的方法的融合。

Collins 等人^[41]提出了基于剪影的模板匹配法。对于每个序列,用步态周期分析方法提取关键帧。每一个步态周期有 4 个关键帧模板,代表每一步态周期的 4 个典型状态。若 a, b 分别是探测集^[7]和档案基集^[7]两个待比较的模板,则 a, b 之间的匹配度为

$$C(a, b) = \frac{\max(\hat{a} * \hat{b})}{\max(\hat{a} * \hat{a}) \max(\hat{b} * \hat{b})}$$

(这里 $\hat{v} = (v - \text{mean}(v)) / (\text{std}(v))$ 是归一化矢量, * 代表相关计算)。然后把得到的一个步态周期中 4 个模板的相似度复合成一个相似度。最好的匹配就是在一个步态周期里对于 4 个相邻关键帧有最大复合相似度的匹配。这种方法的优点是实施起来比较简单;对噪声有鲁棒性;对于较短的只反映一个步幅长度的步态序列就可以使用这种方法。缺点是只能在大致相同的视角下进行识别。这一方法和基线算法有些类似。

Kale 等人^[10,24,42]提出了一种依赖于角度的识别方法,将行人的外轮廓宽度作为图像特征。对于每一个体,用 K 均值聚类算法得到在一个步态周期内的模板集,模板的个数选为 5。使用这些模板计算出一个低维的帧到模板的距离矢量(FED, frame to exemplar distance),用 FED 矢量序列训练一个连续的 HMM(隐马尔可夫模型)。这种方法可紧凑地表达个体的特有结构和动态特征。Kale 认为步态周期可以被看作一个双重随机过程,其中隐过程被表达为站姿之间的转移,而可观测量是在某个特定站姿下所产生的图像。HMM 的统计本质使模式表达和识别都具有鲁棒性。这种方法的优点是:可扩展到区别运动的人和运动的物体,也能用于区别人的不同的运动如走和跑;对步行速度的变化有鲁棒性。其缺点是:受衣服形状的影响极大;对 10° 以上的视角变化较敏感。用 FED 矢量作为步态特征是因为它能很好地对步态的结构特征和转移特征编码。首先,由于自相似,从个体 i 的任一帧图像所得到的剪影宽度矢量到其自身个体 i 的宽度矢量的模

板的欧氏距离,要小于其到另一个体 j 的宽度矢量的模板的欧氏距离,因此可以认为结构信息被编码在 FED 矢量中;其次, FED 编码了个体独特的转移信息,这种转移信息能够区别两个有相同外形的个体。Kale 等人在文献[43]中进一步讨论了基于二进制剪影外轮廓宽度矢量的步态特征的紧凑表达。文中使用的特征矢量是:(1)平滑的和下采样的二进制剪影外轮廓宽度矢量;(2)相继帧差值的二进制剪影外轮廓宽度矢量。平滑和下采样的想法源于认为原有的宽度矢量有冗余性,因此在更低维的空间里的宽度矢量也可能具有很好的识别能力。而采用差值的二进制剪影外轮廓宽度矢量是为了研究动态特征对识别的影响。其中使用的连续 HMM 模型能比离散 HMM 模型更为细致地提取运动信息。而帧到模板的距离矢量则反映了步态中的结构成分。

BenAbdelkader 等人^[11,37,44]将运动物体的图像的自相似 SSP (self-similarity plot) 应用于步态的运动模式的识别。设时间 t 的归一化图像模板为 O_t , 行人被连续跟踪 N 帧,则人的图像自相似 S 由下式计算:

$$S(t_1, t_2) = \sum_{(x,y) \in B_{t_1}} |O_{t_1}(x,y) - O_{t_2}(x,y)|$$

其中, $t_1 \geq 1$, $t_2 \leq N$, B_{t_1} 是在 t_1 帧人的边界框 (bounding box)。

实际上,考虑到跟踪误差,需要计算一个小的搜索区域(半径为 r)里的最小值 S' :

$$S'(t_1, t_2) = \min_{dx, dy | (x,y) \in B_{t_1}} \sum |O_{t_1}(x+dx, y+dy) - O_{t_2}(x,y)|$$

这是一种差分运动分析方法。

Huang 和 Nixon 等人^[45,46]把从光流中提取的时域模板(水平流、垂直流和幅值流模板)以及由剪影提取的空域模板作为特征向量,将模板序列经 EST (eigenspace transformation) 和 CST (canonical space transformation) 投影到个体的规范空间内,识别就在规范空间内进行。这两篇文献讨论了将各种模板及模板的组合作为特征向量的识别效果。光流模板是为了分析运动;而空域模板反映了步态的结构成分。

Hayfron-Acquah 和 Nixon 等人^[47]提出了一种用推广的对称算子分析人行走的对称性以达到识别的目的。该方法用 Sobel 算子提取行人边缘。由对称算子计算边缘上点的对称映射,由所有的对称映射取平均得到步态信号。这种方法源于心理学的感知规律,认为步态是一个对称的运动模式。其优点是

能容许空域数据的丢失、丢帧和一定程度的噪声。这里所提取的边缘反映了形状特征。

Mowbray 和 Nixon 等人^[48]用傅里叶描述子表述步态的周期性变形模式。傅里叶描述子一般被用于建立静止或运动的非刚体物体的边界模型。这里不仅是用它来描述人步行时的边界,还用它来表述这一形状边界的时空变形。这仍是一种描述形状的方法。

4.3 最新研究成果

近来已有更多的研究机构和研究者开始了对步态识别问题的研究。2004 年涌现了不少新的步态识别方法。从已有的研究方法来看,研究者把步态信号看作线性和时不变的信号,而 Kuchi 等人^[49]指出步态信号是一个非线性、时变的信号,应采用非线性、非时变的信号分析方法产生特征向量。Lee 等人^[50]从感知规律出发,认为当人在不熟悉的环境识别熟悉的人脸或步态时是将他们的观察分为内容和形式两种因子,因此可以采用双线性模型。Urtasun 等人^[51]采用 3D 时间运动模型来同步视频序列,这些模型不仅用于跟踪,而且用于恢复运动参数以便识别。这种方法对遮挡和运动方向的改变有鲁棒性,可克服现有方法的局限性。Kale 等人^[52]提出了在单摄像机情况下人脸和步态特征数据的融合方法以及决策融合方法,以发挥步态识别与其他生物认证技术融合的识别潜力。Mowbray 和 Nixon 等人^[53]进一步发展了文献[48]中的方法,结合时空傅里叶描述子强有力的描述能力和 Hough 变换的鲁棒性以检测和提取形状变化的运动物体,而用时空傅里叶描述子描述步态所反映的运动物体的形状变化。其思想是:在形状序列的时-空频率域可方便地分析形状序列的主要结构特征。因此,采用时空傅里叶描述子为区分形状序列提供了一个好的理论基础,可进而实现对形状变化的运动物体的分类和识别。这些文献的发表说明研究者已从医学、机器视觉理论上寻找依据来提取有力的步态特征,进而扩展到从生物力学、认知科学上寻找依据来提取有力的步态特征。同时进一步发掘提取步态的结构特征和运动特征的机器视觉描述方法。

5 决策模型

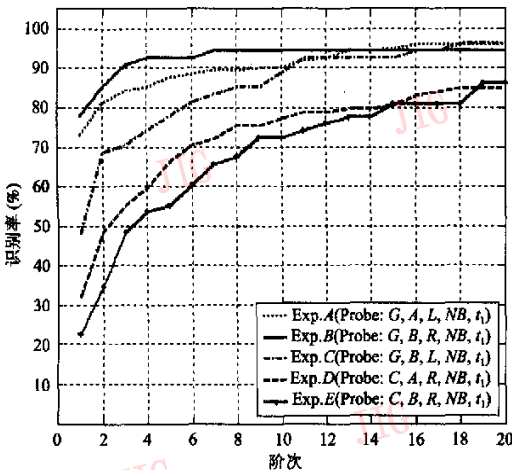
分类器的选择是一个比较困难的问题,在实际应用中,这通常基于使用者恰好能够得到哪种分类器,或者哪种分类器对于使用者来说最为熟悉^[18]。

分类器及其参数的选择和分类器的融合策略这两个方面在决策中是较为重要的。现有的步态识别算法一般采用标准的模式识别方法,如采用模板匹配法、最近邻分类器^[18,19]和留一校验规则^[18,19]对步态的时空模式进行分类,也有采用前馈神经网络分类器进行分类的^[54]。对于分类器参数的选择对识别性能的影响,一些研究者只对其做出了较简单的讨论,如 KNN 分类器的 K 值选择对识别性能的影响^[11];而分类器融合对识别性能的影响的讨论也因为在早期的研究中所提取的特征性质比较单一而没有涉及到分类器融合的问题。现有分类器融合的讨论也仅限于比较简单的融合策略:如乘积、加和、极大、极小规则^[40]。毫无疑问,更成熟的分类器将对识别性能更加有效,但大多数研究的重点仍是在分析所提取步态特征的有效性上。

6 步态识别算法性能评价标准

6.1 对于识别性能的评价

应用决定评价标准。在识别问题里,问题通常不是“算法得出的结果是正确的吗?”,而是“在算法得出的 k 个最佳匹配里含有正确的结果吗?”。这样可使人们知道为了达到某一水平的性能,必须对多少个个体进行考察。这种性能统计方法被称作积累匹配分值(cumulative match scores)。用图形表示时,横轴代表 k 个匹配即阶次,而纵轴是正确匹配的累计百分比^[7]。当 $k=1$ 时,纵轴代表正确识别率。



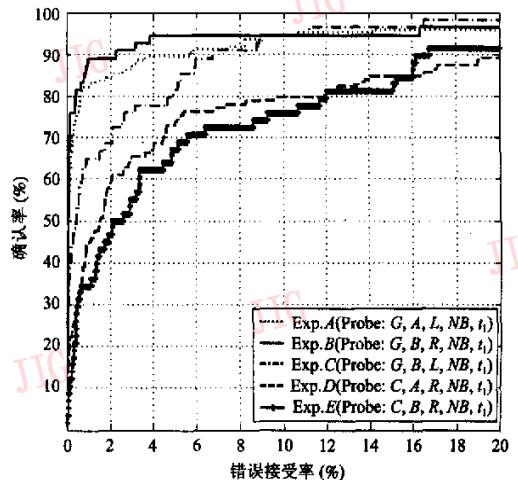
(a) CMC 曲线

6.2 对于校验性能的评价

在校验问题里,算法的输入是待考察人的步态视频序列,此个体被推测是档案集中的某个人,则步态识别系统接受或拒绝这一推测。采用 ROC (receiver operating characteristic) 曲线,分别估计错误接受率(FAR)和错误拒绝率(FRR)^[55]。从 ROC 曲线中可以考察算法性能随错误接受率和错误拒绝率变化的敏感程度。

南佛罗里达大学(USF)对所提出的基线算法,做出了 12 个实验分别用于考察视角;鞋;鞋和视角的综合作用;路面;路面和鞋的综合作用;路面和视角的综合作用;路面、鞋和视角的综合作用;手提提箱的影响;鞋和提箱的综合作用;视角和提箱的综合作用;时间、鞋和衣服的综合作用;路面、时间、鞋和衣服的综合作用。考察以上因素的实验分别对应于实验 A(Exp. A)至实验 L(Exp. L)。图 1 是依据文献[38]算法进行实验的结果,其中的 A、B、C、D、E 与文献[38]的实验 A、B、C、D、E 分别对应。图中图例所表示的 G 和 C 分别代表 grass(草地)和 concret(水泥地);A、B 分别代表两种不同的鞋的类型;R 和 L 分别代表右视角的摄像机和左视角的摄像机所拍摄到的视频序列;NB 表示不提手提箱。从 CMC (cumulative match characteristics) 曲线上可以看出不同实验因素对步态识别结果的影响。从 ROC 曲线上可以看出不同实验影响因素对错误接受率的变化敏感程度。

由于缺乏一个大的标准的数据库,且步态识别



(b) 错误接受率直到 20% 的 ROC 曲线

图 1 USF 基线算法的实验曲线(档案集为 122 人)

Fig. 1 Baseline performance for the challenge experiments (gallery size: 122)

问题的研究还不太成熟,因此对这一问题还不能如同人脸识别问题一样对有代表性的算法进行统一横向的比较。现有的比较仅限于研究者为了评价自己提出的算法而作出的小规模比较。或是在一数据库上实现自己的算法与在同一数据库上其他研究者所报道的识别结果进行比较;或者数据库虽不同,但通过数据库的规模和难易可以推断出不同数据库上的识别结果好坏。这些比较都缺乏统一的标准,不能从整体上评定技术发展水平。

7 现有的主要数据库

在步态识别研究的初期,不同的研究者所得出的识别结果都是根据不同的研究目的所采集的小样本数据库上得到的,算法的识别结果极大依赖于所采用的数据库。早期研究所用的数据库较小,这是受限于计算能力和存储能力。但目前,已有用步态识别研究的较为丰富的数据库。

(1) NIST/USF 数据库^[21]

南佛罗里达大学(USF)和 DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency) 联合建立的步态数据库。被测试者在室外不加控制的光照条件下单人行走,路径为椭圆形轨道。采集条件为①不同的鞋的类型;②提不提手提箱;③草地或水泥地面;④两个不同的视角;⑤相隔 6 个月的两个不同日期。整个数据集包括对 122 个人拍摄的 1870 个序列。

(2) MIT 数据库^[22]

被测试者在室内控制照明的条件下垂直于摄像机的光轴单人行走。在历时 3 个月中的数天进行数据采集。整个数据集包括对 11 名女性,14 名男性拍摄的 194 个视频序列。

(3) CMU 数据库^[23]

用 3D 房间去捕捉多视人体运动的多视序列。每一个被测试者采用 4 种走路的方式(慢步、快步、在倾斜表面上、抱球慢步)在房间中部的跑步机上行走。使用分布在房间内 6 个角度上的 6 个高质量的摄像机同步(3CCD)拍摄。数据集共 25 人。

(4) Georgia Tech 的数据库^[34]

这一数据库联合了运动捕捉实验所得到的数据和不作标记的视频数据。运动捕捉实验是将用于运动捕捉的电磁传感器穿着在试验者不同的身体部位。结合两种数据研究了视角变化的影响。所采集的数据集不超过 20 人。

(5) UM 数据库^[24]

使用监控照相机(Philips G3 EnviroDome)。数据集 1:被测试者以 4 种角度单人行走(迎面走来、背面而去、正侧面行走从左到右,从右到左),数据集共 25 人;数据集 2:被测试者在 T 形路上单人行走,由两个摄像机以正交的视角同时拍摄。在 1 个月之内的不同时间采集数据,数据集共 55 人。

(6) 南安普敦大学的数据库^[16]

被测试者在 3 种采集条件下行走:①在跑步机上,绿色布背景;②在室内,绿色布背景;③在室外,不控制背景,背景很远处有少量行人和汽车。大型数据库约 100 人。小型数据库至少 10 人。研究了鞋、衣服、重物以及步行速度对识别的影响。

用于步态识别的数据库的好处在于:使得研究者可以减少在研究初期由于采集数据而产生的花费。进而,若有一大的标准数据库则可以提供一个标准以利于不同算法在同一数据库上进行比较,以评定技术发展水平、确定将来的研究重点、度量算法的性能。从而可以作出与在人脸识别问题上所作出的 FERET (face recognition technology) 测试^[17]相类似的测试。各研究机构有不同的自己采集的数据库是因没有一个大的标准数据库可以涵盖所有的研究内容所需的数据。就是目前最大的 NIST/USF 数据库也是不太完善的,如 NIST/USF 数据库就不包含用于研究步行速度变化和摄像机拍摄角度变化对步态识别影响的数据,且步行轨迹只是限制于椭圆。因此,目前的研究者只能基于各自不同的研究目的和兴趣去选用适当的数据库。未来的研究发展需要一标准数据库,且该标准数据库应较全面地包含同一个人不同影响因素下的步态数据以更深入地发掘个体之内的变化;应包含更多的试验个体,以更深入地考察在有限的个体之内的变化下的个体之间的变化,从而可以更好地度量步态识别作为一种生物认证技术的潜力;应较全面地包含用于考察在图像质量较差的情况下不精确的特征提取对识别的影响的数据。步态识别数据库应处于不断的丰富之中。

8 结 论

从以上的分析可以看出,步态识别问题无论在实际应用,还是在计算机视觉领域都是很值得研究的问题。目前的研究还只是处于初级阶段,识别算法还只是基于受限的实验室条件或一些简单的假

设,对此问题的研究还有很大的发展空间。关于步态识别问题的研究尚存在以下一些薄弱之处:(1)基于红外视频序列的步态识别的研究还比较少;(2)现有步态识别算法多是假定图像中只有单个人行走,或背景不太复杂的情况,而实际监控场景可能比较复杂,有多个运动物体,因此研究图像噪声对识别的影响较为重要;(3)现有的算法对步态本身的分析比较多,而对人的感知规律运用得比较少,并且还没有看到基于连接机制的特征提取方法;(4)不同的数据特征和特征提取方法决定了采用何种分类器及相应的分类器参数的选择,只有精心地进行特征提取和分类器参数设计,才能给出可靠的识别结果,但目前步态识别算法中对分类器设计的讨论还不太多;(5)目前所使用的数据库规模还比较小,对算法从小规模数据库的识别效果推知在大规模数据库上的识别效果的研究还不太多,只有文献[57]中对这一问题做了探讨;(6)随着对人的运动分析、形状表示和基于2维图像的人体建模和表述问题的进一步研究,步态识别问题应吸收它们的研究成果以得到同时包含运动和结构信息的更具有识别力的步态特征的表达。

参考文献 (References)

- 1 Tang Xiao-ou, Ma Song-de, O' Gorman Lawrence, *et al.* Guest editorial: introduction to the special issue on image-and video-based biometrics—part II [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(2): 146 ~ 148.
- 2 Murray M P, Drought A B, Kory R C. Walking patterns of normal men[J]. *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 Cutting J, Barclay C, Kozlowski L. Temporal and spatial factors in gait perception that influence gender recognition[J]. *Perception and Psychophysics*, 1978, 23(2): 145 ~ 152.
- 5 Cutting J, Kozlowski L. Recognition friends by their walk: gait perception without familiarity cues[J]. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 1977, 9(5): 353 ~ 356.
- 6 Ralston H J, Inman V, Todd F. *Human Walking*[M]. Baltimore: Williams and Wilkins, 1981.
- 7 Phillips P J, Moon H, Rizvi S, *et al.* The FERET evaluation methodology for face-recognition algorithms[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(10): 1090 ~ 1104.
- 8 Nixon M S, Carter J N, Cunado D, *et al.* Automatic gait recognition [A]. In: *Biometrics: Personal Identification in Networked Society* [M], Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999: 231 ~ 250.
- 9 Cunado D, Nixon M S, Carter J N. Automatic extraction and description of human gait models for recognition purposes [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2003, 90(1): 1 ~ 41.
- 10 Kale A, Rajagopalan N, Cuntor N, *et al.* Gait based recognition of humans using continuous HMMs [A]. In: *Proceeding of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition* [C], Washington D C, USA, 2002: 321 ~ 326.
- 11 BenAbdelkader C, Cutler Ross, Davis Larry. Gait Recognition Using Image Self-Similarity [EB/OL]. <http://figment.csee.usf.edu/GaitBaseline/>, 2004-01-15.
- 12 Wang Liang, Tan Tie-niu, Hu Wei-ming, *et al.* Automatic gait recognition based on statistical shape analysis[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(9): 1120 ~ 1131.
- 13 Aggarwal J K, Cai Q. Human motion analysis: a review [A]. In: *IEEE Proceedings of Nonrigid and Articulated Motion Workshop* [C], San Juan, Puerto Rico, 1997, 1: 90 ~ 102.
- 14 Cedras C, Shah M. A survey of motion analysis from moving light displays [A]. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR '94* [C], Seattle, Washington, USA, 1994: 214 ~ 221.
- 15 Vogler C, Sun H, Metaxas D. A framework for motion recognition with applications to American sign language and gait recognition [A]. In: *Proceedings of Workshop on Human Motion* [C], Austin, Texas, USA, 2000: 33 ~ 38.
- 16 Cutler R, Davis L S. Robust real-time periodic motion detection, analysis, and applications [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 781 ~ 796.
- 17 BenAbdelkader C, Cutler R, Davis L. Motion-based recognition of people in EigenGait space [A]. In: *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition* [C], Washington DC, USA, 2002: 254 ~ 259.
- 18 Anil K Jain, Robert P W Duin, Mao Jianchang, *et al.* Statistical pattern recognition: a review [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(1): 4 ~ 37.
- 19 Duda Richard O, Hart Peter E, Stork David G. *Pattern Classification* [M]. New York: Wiley, 2001. [Duda Richard O, Hart Peter E, Stork David G 著. *Pattern Classification* [M]. 李宏东, 姚天翔等译, 北京: 机械工业出版社, 中信出版社, 2003.]
- 20 Fu K S. *Application of Pattern Recognition* [M]. Boca Raton, Florida, CRC Press, 1982. [Fu K S 著. *模式识别应用* [M]. 傅京孙主编, 程民德, 石青云, 戴汝为等译, 北京: 北京大学出版社, 1990.]
- 21 Phillips P J, Sarkar S, Robledo I, *et al.* The gait identification challenge problem: data sets and baseline algorithm [A]. In: *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*, 2002 Proceedings [C], Quebec, Canada, 2002, 1: 385 ~ 388.
- 22 Lee L, Grimson W E L. Gait analysis for recognition and classification [A]. In: *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition* [C], Washington DC, USA, 2002: 148 ~ 155.
- 23 Gross R, Shi J. The CMU Motion of Body (MoBo) Database [R]. CMU-RI-TR-01-18, Pittsburgh, USA: Robotics Institution, Carnegie Mellon University, 2001.

- 24 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.
- 25 Bhanu B, Han J. Kinematic-based human motion analysis in infrared sequences [A]. In: *Proceedings of Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision [C]*, Orlando, Florida, United States, 2002: 208 ~ 212.
- 26 Tanawongsuwan R, Bobick A. Gait recognition from time-normalized joint-angle trajectories in the walking plane [A]. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Kauai, HI, USA, 2001: II-726 ~ II-731.
- 27 Grant M G, Shutter J D, Nixon M S. Analysis of a human extraction system for deploying gait biometrics [A]. In: *Proceedings of 6th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation [C]*. Lake Tahoe, USA, 2004: 46 ~ 50.
- 28 Jabri S, Duric Z, Wechsler H, *et al.* Detection and location of people in video images using adaptive fusion of color and edge information [A]. In: *Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition [C]*. Barcelona, Spain, 2000, 4: 627 ~ 630.
- 29 Stauffer C, Grimson W E L. Adaptive background mixture models for real-time tracking [A]. In: *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Fort Collins, Colorado, USA 1999, 2: 246 ~ 252.
- 30 Lee L, Dalley G, Tieu K. Learning pedestrian models for silhouette refinement [A]. In: *Proceedings of Ninth IEEE International Conference on Computer Vision [C]*, Nice, France, 2003: 663 ~ 670.
- 31 Pao Yoh-Han. *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks [M]*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. [包约翰著. 自适应模式识别与神经网络 [M]. 马颂德, 张恭清, 高雨青译, 北京: 科学出版社, 1992.]
- 32 Cunado D, Nixon M S, Carter J N. Using gait as a biometric, via phase-weighted magnitude spectra [A]. In: *Proceedings of 1st International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication [C]*, Grans-Montana, Switzerland, 1997: 95 ~ 102.
- 33 Cunado D, Nash J M, Nixon M S, *et al.* Gait extraction and description by evidence-gathering [A]. In: *Proceedings of the Second International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication AVBPA [C]*, Washington DC, USA, 1999: 43 ~ 48.
- 34 Johnson Bobick. A Multi-view method for gait recognition using static body parameters [A]. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Audio-and Video Based Biometric Person Authentication [C]*, Halmstad, Sweden, 2001: 301 ~ 311.
- 35 Bobick A F, Johnson A Y. Gait recognition using static, activity-specific parameters [A]. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Kauai, HI, USA, 2001, 1: I-423 ~ I-430.
- 36 BenAbdelkader C, Cutler R, Davis L. Stride and cadence as a biometric in automatic person identification and verification [A]. In: *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Washington DC, USA, 2002: 357 ~ 362.
- 37 Niyogi S A, Adelson E H. Analyzing and recognizing walking figures in XYT [A]. In: *Proceedings of 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Seattle, Washington, USA, 1994: 469 ~ 474.
- 38 Sarkar S, Phillips P Jonathon, Liu Z, *et al.* The human ID gait challenge problem: data sets, performance, and analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2): 162 ~ 177.
- 39 Wang Liang, Hu Wei-ming, Tan Tie-niu. Gait-based human identification [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(3): 1 ~ 7. [王亮, 胡卫明, 谭铁牛. 基于步态的身份识别 [J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 1 ~ 7.]
- 40 Wang Liang, Ning Hua-zhong, Tan Tie-niu, *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.
- 41 Collins R T, Gross R, Jianbo Shi. Silhouette-based human identification from body shape and gait [A]. In: *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]*, Washington DC, USA, 2002: 351 ~ 356.
- 42 Kale Amit, Cuntoor Naresh, Chellappa Rama. A framework for activity specific human identification [A]. In: *Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]*, Orlando, FL, USA, 2002, 4: IV-3660 ~ IV-3663.
- 43 Kale A, Cuntoor N, Yegnanarayana B, *et al.* Gait Analysis for Human Identification [EB/OL]. <http://degas.umiacs.umd.edu/hid/avbpa.pdf>, 2005-02-03.
- 44 BenAbdelkader C, Cutler Ross, Nanda Harsh, *et al.* EigenGait: Motion-based Recognition of People using Image Self-similarity [EB/OL]. http://degas.umiacs.umd.edu/hid/chiraz_avbpa67.pdf, 2005-02-03.
- 45 Huang P S, Harris C J, Nixon M S. Comparing different template features for recognizing people by their gait [A]. In: *Proceedings of Ninth British Machine Vision Conference [C]*, Southampton, England, 1998: 639 ~ 648.
- 46 Huang P S. Automatic gait recognition via statistical approaches for extended template features [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 2001, 31(5): 818 ~ 824.
- 47 Hayfron-Acquah J, Nixon M S, Carter J N. Automatic Gait Recognition by Symmetry Analysis [EB/OL]. <http://figment.csee.usf.edu/GaitBaseline/>, 2004-01-15.
- 48 Mowbray S D, Nixon M S. Automatic gait recognition via fourier descriptors of deformable objects [A]. In: *Proceedings Audio Visual Biometric Person Authentication [C]*, Guildford, UK, 2003: 566 ~ 573.
- 49 Kuchi P, Panchanathan S. Intrinsic mode functions for gait recognition [A]. In: *Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems [C]*, Vancouver, Canada, 2004, 2: II-117 ~ II-120.
- 50 Lee Chan-su, Elgammal A. Gait style and gait content: bilinear

- models for gait recognition using gait re-sampling [A]. In: Proceedings of Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]. Seoul, Korea, 2004; 147 ~ 152.
- 51 Urtaasun R, Fua P. 3D tracking for gait characterization and recognition [A]. In: Proceedings of Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Seoul, Korea, 2004; 17 ~ 22.
- 52 Kale A, Roychowdhury A K, Chellappa R. Fusion of gait and face for human identification [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Montreal, Canada, 2004, 5; V-901 ~ V-904.
- 53 Mowbray S D, Nixon M S. Extraction and recognition of periodically deforming objects by continuous, spatio-temporal shape description [A]. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Washington DC, USA, 2004, 2; II-895 ~ II-901.
- 54 Yoo J-H, Nixon M S. On laboratory gait analysis via computer vision [A]. In: Proceedings AISB '03 Symposium on Biologically-Inspired Machine Vision, Theory and Application [C], University of Wales, Aberystwyth, UK, 2003; 109 ~ 113.
- 55 Moon, Phillips P J. The FERET verification testing protocol for face recognition algorithms [A]. In: Proceedings of Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C], Nara, Japan, 1998; 48 ~ 53.
- 56 Shutler J D, Grant M G, Nixon M S, *et al.* On a large sequence-based human gait database [A]. In: Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Soft Computing [C], Nottingham UK, 2002; 66 ~ 72.
- 57 Amos Y Johnson, Jie Sun, Aaron F Bobick. Predicting large Population Data Cumulative Match Characteristic Performance from Small Population Data [EB/OL]. http://www.cc.gatech.edu/cpl/amos/mypapers/avbpa_2003.pdf, 2004-04-14.