

# 基于机器学习的目标跟踪算法研究综述

曹东<sup>1,2,4</sup> 付承毓<sup>1,3</sup> 金钢<sup>2</sup>

(中国科学院光电技术研究所 成都 610209)<sup>1</sup> (中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)<sup>2</sup>

(中国科学院光束控制重点实验室 成都 610209)<sup>3</sup> (中国科学院大学 北京 100049)<sup>4</sup>

**摘要** 在视频目标跟踪研究中,基于机器学习的理论和算法成为了一个重要的发展方向。在线学习通过对样本持续的学习和更新从而适应背景环境以及目标的变化,能够获得更好的目标跟踪效果。根据算法的特点,将在线学习方法分为集成学习方法、判别式学习方法和核函数学习方法 3 类。重点对每类中具有代表性的几种方法进行详细描述,并分析其优缺点。最后还分析了机器学习方法在目标跟踪研究中面临的问题和未来的研究趋势。

**关键词** 目标跟踪,机器学习,算法,综述

中图分类号 TP181 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.12.001

## Survey of Target Tracking Algorithms Based on Machine Learning

CAO Dong<sup>1,2,4</sup> FU Cheng-yu<sup>1,3</sup> JIN Gang<sup>2</sup>

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)<sup>1</sup>

(Computational Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)<sup>2</sup>

(Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)<sup>3</sup>

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)<sup>4</sup>

**Abstract** The theories and algorithms based on machine learning on video target tracking become an important direction of development. On-line learning, through continuous learning and update of the sample to adapt background environment and the change of target, performs better in target tracking. According to the characteristics of the algorithms, the on-line learning methods is divided into ensemble learning method, discriminant learning method and kernel learning method. The detailed descriptions of the representative methods for each class were presented. Finally, the challenges of applying machine learning to target tracking and some interesting research trends were pointed out.

**Keywords** Target tracking, Machine learning, Algorithm, Survey

## 1 引言

目标跟踪技术在军事侦察、火力打击、精确制导、战场评估及安防监控、智能交通系统、人机交互、虚拟现实等方面有着广泛的应用,是机器视觉研究领域的热点之一。对视频目标的长时间稳定跟踪的最大困难在于,跟踪过程中目标姿态是不断变化的,所处背景也是复杂多变的,这就要求对目标的检测判别必须时刻变化。研究人员在目标跟踪方面进行了大量的研究工作,并取得了一定的进展<sup>[1-5]</sup>。目前目标跟踪技术方法主要有以下 3 类<sup>[6]</sup>:

(1) 基于统计的跟踪方法。该方法主要利用目标灰度直方图、色彩等统计信息,通过基于距离度量的特征匹配分类技术,对图像中的目标进行识别。如帧间差分方法<sup>[7-9]</sup>、均值偏移算法<sup>[10,11]</sup>等,该类方法计算量小,简单直观,当目标和背景有较大差别时它才比较有效。

(2) 基于模型的跟踪方法。构建目标样本空间模型及目标模型参数,通过选取初始假设,实现目标特征的预测。一般

来说,目标的特征都是结构化的,比如人是由头、躯干和四肢等构成,车由车身和轮子构成,人脸由五官构成,等等。这种结构化信息可以将目标准确地从过复杂场景中检测出来。Dalal 和 Triggs 等人<sup>[12]</sup>用 HOG 实现了对行人结构的检测,取得了优异的成绩,并将其广泛应用于行为特征的表示。但单一的全局模板有一个局限,它无法对比行人姿态更多样化的行为。研究者提出了多种背景参数模型建立方法<sup>[13-16]</sup>,试图从不同的角度来减少或解决图像序列中背景的变化对运动目标检测结果的影响。其他方法中,例如中值滤波法<sup>[17]</sup>、W4 方法<sup>[18]</sup>和线性预测法<sup>[19]</sup>是非递归背景减除法,仅利用当前一段时间内的图像序列信息来进行背景建模,而不考虑已有的背景参数模型的信息。

(3) 基于特征的跟踪方法。基于特征的目标检测通常将目标和待检测图像通过关键点以及关键点邻域内的信息描述目标,或者通过局部区域内的特征信息描述目标。如早期提出的角点特征检测<sup>[20]</sup>、Harris 特征检测<sup>[21]</sup>等。该方法的准确性较高,而且对灰度变化及角度变化具备较好的鲁棒性,所

到稿日期:2015-11-20 返修日期:2016-01-20 本文受中国科学院科技创新基金项目(YJ14K017)资助。

曹东(1983—),男,博士生,工程师,主要研究方向为光电成像目标跟踪、计算机视觉等,E-mail:cdcardc@163.com;付承毓(1952—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为光电工程、信号与信息处理等;金钢(1958—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学工程、信号处理。

以 Harris 角点检测方法仍然是目前常用的特征点检测方法。Lowe<sup>[22]</sup> 提出了著名的局部特征 SIFT(尺度不变特征变换), 可以有效地适应尺度、旋转、仿射和视角等变化带来的影响。在该算法中, 利用高斯核滤波器构造图像金字塔以进行差分处理, 得到拉普拉斯高斯空间极值点, 使之具有更好的适应性。Bay<sup>[23]</sup> 沿用 SIFT 算法思路, 提出 Speeded Up Robust Feature, 简称为 SURF 局部特征, 该方法利用 Harr 小波与积分图像结合, 进一步提高了关键点检测速度。之后在 SIFT 算法的影响下, 在特征描述中加入了除灰度以外的颜色等其他特征, 使得局部特征匹配更为准确。因为图像中关键点数量过多, 还有研究者提出全局 DAISY<sup>[24]</sup>, 它是一个可快速计算的提取稠密特征的局部图像特征。

基于机器学习理论<sup>[25-27]</sup> 的目标检测跟踪是近年来发展较快的一个领域, 其基本思想是模拟人工智能, 使目标跟踪具有一定的自我学习与判断的能力, 从而使目标跟踪能够随目标、背景的变化而变化, 保持长时间的稳定跟踪。

机器学习方法是通过获得某一种目标的大量样本, 训练得到其分类, 它可以被用来检测目标的图像或视频。该方法需要得到大量的样本, 并对这些样本的类别进行标注。由于图像包含的目标具有各种形式, 很难获取一个完整的样本来包含所有的目标。因此, 它是很难实现较高检测率的训练有素的分类。这种传统的学习方法属于离线学习的方法, 训练的分类是固定的, 一旦训练样本是不完整的或选择不恰当, 整个分类器必须重新训练, 因此在线学习方法应运而生。

不同于传统的离线学习方法, 在线学习方法对每一个样本只学习一次, 并且该类的样本被自动标记, 不需要存储研究样本, 节省了存储空间。其核心思想是通过不断地学习和更新样本, 使分类器适应不断变化的检测环境和目标。

本文将基于机器学习的目标跟踪算法分为 3 大类, 即集成学习方法、判别式在线学习方法和核函数在线学习方法, 并对它们的设计原理、实现技术、方法和适用范围以及目前最新的研究进展进行了研究分析。最后讨论了在线学习在目标跟踪研究中的发展趋势。

## 2 集成学习方法

### 2.1 在线 Boosting 算法

Boosting 算法<sup>[28]</sup> 是基于 PAC (Probably Approximately Correct) 模型的, 也被称为强化学习或增强法, 是一种重要的集成学习技术。Kearns 等人<sup>[29]</sup> 提出了“是否可以由多个比随机猜测略好的弱分类器”提升成为一个强分类器的假设。Schapire<sup>[30]</sup> 在 1990 年提出多项式 Boosting 算法, 对上述假设问题进行了详明的阐述和证明: 如果多个 PAC 分类器集成为一个强分类器, 那么这个强分类器将具有各弱分类器的泛化性能。1993 年 Drucker 等<sup>[31]</sup> 最早在光学字符识别中用到 Boosting 算法。

Oza 提出了在线 Boosting 算法<sup>[32]</sup>, 并将基于弱分类器的 winnow 算法<sup>[33]</sup>、统一线性预测算法<sup>[34]</sup> 等和 Boosting 算法结合起来。在线学习中, 每一个弱分类器的集合中的弱分类器被每个训练样本(包括正面和负面的样本)更新其分类阈值和权重。因此, 每次一个样本可以得到弱分类器赋予的权重, 将其加入强分类器, 使分类器具有很强的分类能力。

文献[35-37]对在线 Boosting 方法进行了改进, 利用可辨

别性高的特征(如方向直方图、局部二值模式等)实时地对阈值做相应调整, 再利用卡尔曼滤波、粒子滤波等进行动态调整, 以得到稳定的跟踪结果。但该算法也存在一定缺陷, 当目标较长时间被遮挡或目标移出视野或短时间位移较大时, 容易产生跟踪误差而导致跟踪漂移。

文献[38]研究了遮挡条件下目标跟踪的方法。将特征划分为多个子特征, 构建一种子区域分类器, 选择子区域中的分类器形成强分类器, 降低遮挡区域对目标跟踪的影响, 子区域特征池的更新解决了在线更新时的误差积累问题; 但是在目标尺寸发生变化时效果不太理想, 且计算量较大。

### 2.2 在线 Adaboost 算法

集成学习技术在一定程度上扩展了在线学习的应用范围。在很多离线学习方法的分类器中都可以加入在线学习获得的新样本进行持续的改进, 从而提高目标跟踪的性能。Freund 等<sup>[39]</sup> 提出了新的 Boosting 方法, 将加权投票和在线分配算法相结合, 这就是著名的 AdaBoost 算法<sup>[40]</sup>。AdaBoost 算法不需要任何先验知识, 因此得到了广泛的应用<sup>[41]</sup>。Grabner<sup>[42]</sup> 将 Haar-like 特征应用于 Boosting 算法, 提出在线 Adaboost 方法, 使得在线学习的应用范围进一步扩大, 可应用到目标跟踪领域。Haar-like 特征用 5 个元素表示, 其特征值是矩形中相邻区域灰度值以及其差值, 用以体现目标局部的灰度变化。一般情况下, 基于特征的目标检测技术比基于像素的目标检测有更好的表现。图 1 为最基本的 5 种矩形特征。

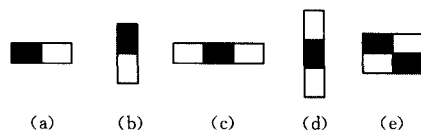


图 1 5 种 Haar-like 矩形特征

AdaBoost 算法为更好地解决实际问题带来了新的思想。其他集成学习方法构造的分类器越来越复杂, 而 AdaBoost 算法认为将简单的分类器组合得到的强分类器更有效。AdaBoost 算法应用很广泛<sup>[41]</sup>, 已经在人脸识别<sup>[43,44]</sup>、人体动作识别<sup>[45]</sup>、目标检测<sup>[46]</sup>、车辆识别<sup>[47,48]</sup> 以及视频文字定位等自然语言处理领域<sup>[49,50]</sup> 有了成功的工程应用。

AdaBoost 算法在目标检测跟踪中的应用主要利用目标特征来构建分类器, 实现特定目标的检测, 目前多应用于人脸识别和行人检测跟踪。如朱谊强等<sup>[51]</sup> 提出了 4 种矩形特征来描述人体形状局部特征, 并对 AdaBoost 算法进行改进, 减小了计算量, 其对视频监控系统的中远距离行人检测有较好的效果。朱健翔等<sup>[52]</sup> 在 Adaboost 算法中加入 Gabor 特征进行人脸表情识别, 将最近邻和支持向量机合成分类器, 从而降低特征向量维数; 其不足在于没有考虑人脸形状信息, 在快速变化等环境下容易发生检测错误。

### 2.3 随机森林

随机森林(Random Forests, RF) 也是一类集成学习算法, 是由 Leo Breiman<sup>[53]</sup> 于 2001 年提出的。随机森林是由称为决策树的基本分类单元组合构成。其基本思想是让所有决策树都参与投票, 最后对分类结果进行整合, 由此确定样本的类型, 其结构如图 2 所示。随机森林具有分类效果好、抗噪声干扰强和不容易出现过拟合等优点。

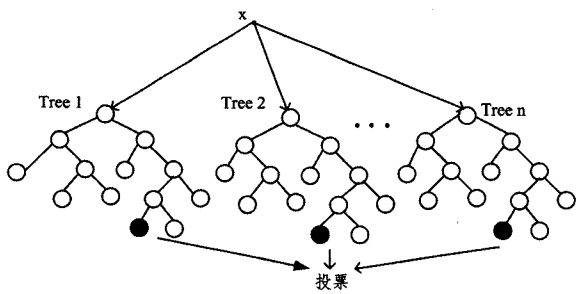


图2 随机森林结构示意图

Saffari 等<sup>[54]</sup>在此基础上提出了在线随机森林学习算法。在线随机森林方法在每个节点创建时随机生成若干候选分裂准则(弱分类器)。当得到样本时更新节点的统计量,即样本类别分布以及每个分裂准则对应下各子节点中的类别分布信息。当满足下面两个条件时分裂为两个子节点:1)该节点获得足够的训练样本;2)在设定的分裂准则下,信息增益超过一定阈值。因此,在线随机森林也无需在节点储存样本,只需维护节点信息及其候选分裂准则对应的样本统计量。

近年来,随机森林被广泛应用于计算机视觉的特征点识别<sup>[55]</sup>、目标检测<sup>[56]</sup>、姿态估计<sup>[57]</sup>和人体部件识别<sup>[58]</sup>等领域。文献<sup>[59]</sup>利用粒子滤波结合随机森林分类构建目标跟踪的方法,通过对在线样本的学习,获取目标轮廓的概率分布;采用随机森林分类结果及区域直方图相似度来估计粒子相似度,从而提高观测模型的精度。文献<sup>[60]</sup>提出了基于随机森林和协同训练的跟踪框架,设计了带权重的系数来更新分类器。但是在确定分裂准则方面,由于在线随机森林中随机树的在线生长依赖于完整的学习样本信息,需要提前遍历所有的学习样本,并记录每一维的最大值与最小值。为解决这些问题,由随机森林派生而来的增量随机森林<sup>[61]</sup>、极端随机森林<sup>[62]</sup>、霍夫森林<sup>[63]</sup>等成为了当前的研究热点,并且表现出良好的目标跟踪性能。王爱平等<sup>[62]</sup>设计的增量式极端随机森林分类器,对于有限数量的样本,能够快速对分类器进行扩展;在目标有旋转、尺度变化等情况下,可以实现对目标进行稳定可靠地跟踪,并有跟踪多个目标的能力。

### 3 判别式在线学习方法

#### 3.1 协同训练学习

协同训练(Co-Training)算法<sup>[64]</sup>是 Blum 和 Mitchell 提出的。如果数据集有两个完全冗余视图,且每个属性集的视图可以被这个问题描述,那么在训练样本较多的情况下,每个属性集各能获得一个强学习器,并且属性集互相独立。在这两种视图中,使用两个分类器对协同训练算法进行训练,每一个分类器都被标记为未标记样本,数据被添加到标记的数据中,用新的标记训练集对分类器进行更新。其流程如图3所示。

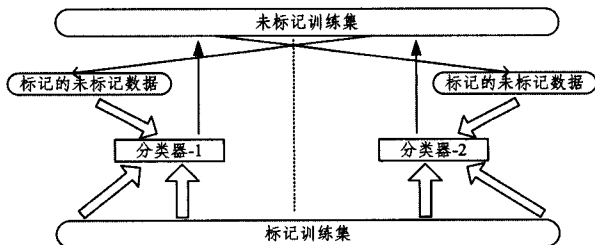


图3 协同训练流程图

然而,协同训练的技术难点在于:1)很多分类问题的充分冗余视图难以满足。当样本集足够大时,可以对属性集进行随机划分以得到两个视图,也可训练得到较好的结果。但是往往很多分类问题的属性集不能满足足够大的条件。2)两个协同分类器的性能对标签的训练效果有很大的影响。为了提高分类正确率,一般采用不同类型的分类器。因此,该方法可以提高分类器的检测率,但由于两个分类器被标记,而标签的正确性没有得到验证,因此很难达到较高的检测率。此外,由于要训练两个分类器,它很难使用于实时在线学习的过程中。为了放松约束条件,周和李提出了 Tri-training 算法<sup>[65]</sup>,该方法既不要求充分冗余视图,也不需要不同类型的分类器。Tri-training 算法通过3个分类器来标记置信度估计及新样本的预测,而且通过集成学习来提高泛化能力。

齐志泉等<sup>[66]</sup>构建的 Haar 特征和局部梯度直方图特征集 Boosting 算法模型,利用 co-training 框架协同训练,来避免模型误差累积和跟踪丢失帧的问题。但是该方法对有遮挡情况的目标跟踪不太适用。李善青等人<sup>[67]</sup>提出了一种快速的自适应目标跟踪方法,采用 HOG 和 LBP 描述目标特征并建立分类器,实现分类器的在线更新,有效解决了误差累积问题。另外,朱建章等<sup>[68]</sup>将协同训练和压缩跟踪相结合,提出了一种在协同训练框架下变权重压缩跟踪算法,把样本的重要性引入到压缩跟踪器在线学习过程中。该方法以目标跟踪结果为参考,赋予距离跟踪结果近的正样本较高的权重,反之赋予较低的权重,这样通过有区分地对待不同的正样本来提高分类器的分类精度。

#### 3.2 多示例学习

为了克服在线 AdaBoost 算法由于误差积累引起的跟踪漂移问题,Grabner 等<sup>[69]</sup>改进了半监督学习算法,只在第1帧中进行样本标注,用后续帧中未标注的样本和已标注的样本来更新分类器。此方法使目标跟踪的适应性得以改进,但在目标存在快速变化的情况下跟踪性能会下降。Babenko 等<sup>[70]</sup>认为漂移对训练样本进行了歧义标注,而如果能够在目标周围获取一些正样本包来更新分类器,则可以减少训练样本的歧义。这即是在线多示例学习跟踪算法。训练样本被分为多个具有相同属性的样本包。如果在包中包含至少一个正例子,该包是一个正包,否则它是一个负包。将目标模板以及与其只有较小误差的若干邻域模板组成的模板集合作为正包,其余包作为负包,那么学习的目的就是预测新包的类别,由此构成的样本标记就具有很好的鲁棒性。多示例学习问题描述如图4所示。

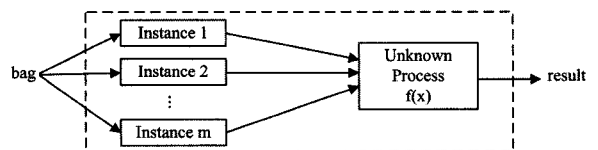


图4 多示例学习问题描述

传统的学习算法训练一个二值分类器来估计  $p(y|x)$ ,要求训练数据的形式为  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_s, y_s)\}$ ,其中  $x_i$  是一个示例,  $y_i \in \{0, 1\}$  是一个示例标签。在多示例学习中,假设有  $N$  个数据包  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ ,每个包有  $s$  个示例。只要包中有一个为正例,该包则为正样本包,如图5所示。

与传统监督学习对比,多示例学习在学习过程中与其有类似之处,二者都形成一个特征池,根据自己的代价函数从特

征池中不断挑选对分类有效的特征,最后得到一个强分类器。但多示例学习是将训练样本包作为一个单元被标记,其中的样本是未标记的,而传统的监督学习中每一个样本都是被一一标记的。

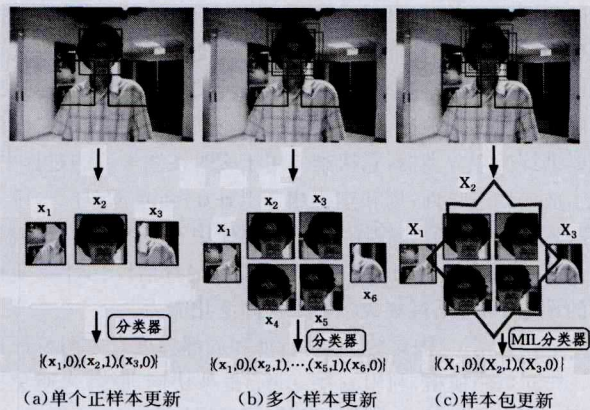


图5 多示例样本分类器

将多示例学习用于目标跟踪时其重点还是在分类器的构建上。文献[71]中,多个弱分类器利用 Haar 特征构造得到,然后串联成多示例学习分类器。强分类器是用来确定最有可能的位置,将其作为跟踪结果,并利用位置不同的邻域图像作为正、负数据包来更新多样本学习强分类器。该方法还适用于目标外观发生较明显变化的情况。文献[72]将稀疏性引入多示例学习,训练数据为目标局部的稀疏编码。该算法对于有较大姿势变化的目标有较好的跟踪效果。还有研究人员[73]采用检测和跟踪相结合的方法,利用中值滤波算法作为跟踪器。一个强分类器由几个随机森林弱分类器构成,用一个在线多示例学习方法更新检测器,并最终将检测器、跟踪器的结果相融合得到最终的目标位置。该方法对目标漂移有较强的鲁棒性。

### 3.3 P-N 学习

P-N 学习方法[74]由瑞典的 Kalal 博士提出,用于其建立的 TLD(Tracking Learning Detection)目标跟踪算法[75]。与 Boosting 方法仅利用数据相似性对未标注数据进行分类不同,P-N 学习方法引入了限制条件,对未标注数据集的标注过程进行限制和控制。P-N 学习主要是通过先验标记样本和未标记的样本来训练分类器,并利用未标注数据集提升其性能。P-N 学习主要由两类结构约束组成,即正约束(P 约束)和负约束(N 约束)。P-N 约束对未被标记的样本进行标记分类,之后训练分类器。正约束是指将未知样本标记为正样本的约束条件,即靠近目标轨迹附近的样本。负约束则是将远离轨迹的样本标记为负样本。其通过正负约束的双重作用来提高样本标记的准确性。训练过程如图 6 所示。

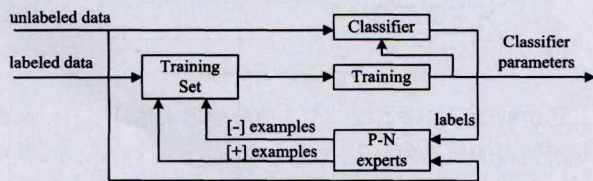


图6 P-N 学习训练过程

限制条件是 P-N 学习提升分类器性能的关键。其本质是输入一个已标注样本集,输出一个由所有改变了标签的样本组成的更正集。P-N 学习对限制条件的个数没有要求,可

以添加任意数量的限制条件来提升训练样本质量。但所有的限制条件被分为两种,即 P 限制条件和 N 限制条件,这也是 P-N 学习名称的由来。Kalal 还分析了限制条件对分类器质量的影响[75]。限制条件在分类器初步分类的基础上,对部分违反数据假设的样本进行类别标签更正。同分类器做出的分类结果并不完全可靠一样,限制条件所做的更正也包含有错误的更正。P-N 学习对单个限制条件无特殊要求,只要若干限制条件组合起来得到的状态转移矩阵  $M$  有小于 1 的特征值,就可以达到优化分类器性能的效果。

TLD 算法将检测器与跟踪器相结合,解决了长时间目标跟踪可能遇到的目标尺寸变化、外形变化以及背景变化等情况。该算法具有较好的跟踪性能,但是在目标发生较大形变等情况下容易发生跟踪漂移。周鑫等[76]改进了 TLD 算法,为了改善局部跟踪器的布局和局部跟踪的成功或失败的预测方法,用卡尔曼滤波来估计当前帧目标,缩小检测器的计算范围,根据马尔可夫模型的预测,提高检测器的类似的目标识别能力。文献[77]对图像中的每一个滑动窗口的 HOG 特征向量进行检测,与 NCC 分类器进行特征匹配,从而对检测器进行更新。该方法具有较好的鲁棒性和实时性。

## 4 核函数在线学习方法

### 4.1 支持向量机

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)[78]的理论基础为统计学习理论和结构风险最小原理,利用有限的样本信息,构建复杂度不高的模型,从而获取较好的学习能力及泛化能力。该方法常被用于小样本、非线性和高维模式识别等方面。SVM 首先应用于线性可分的情况,对于线性不可分,通过构建核函数的方法实现了线性到非线性之间的变换,避免了维数灾难,减小了计算量。同理,只涉及样本内积运算的机器学习方法都可改造为核函数方法。

当使用不同的映射函数时,生成特征空间的维数变化很大。SVM 通过定义核函数来解决这一问题,即将分类中涉及到空间的内积用核函数来代替,从而简化了计算量。故核函数对 SVM 的性能影响很大。目前常用的核函数有以下 4 类。

- (1)线性函数:  $K(x, y) = x * y$ ;
- (2)多项式核函数:  $K(x, y) = [(x * y) + 1]^q$ ;
- (3)径向基函数:  $K(x, y) = \exp(-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2})$ ;
- (4)内积函数:  $K(x, y) = \tanh(r * x \cdot y + c)$ 。

Avidan[79]利用 SVM 良好的分类性能和支持小样本训练的特点,将支持向量机应用于目标跟踪,取得了较好的效果。随后,宋华军等[80]将 Gabor 特征引入 SVM 构建分类器,将不同方向、不同位置及不同尺度 Gabor 小波滤波器与输入图像进行卷积运算得到 Gabor 特征,最后通过 SVM 算法实现特征分类进行目标跟踪,该算法在跟踪精度和速度上都具有较高的效率。2007 年, Tian 等人提出 SVM 集成跟踪算法[81],该算法将多个线性 SVM 分类器并行处理,在复杂场景条件下表现出较高的鲁棒性。

在目标跟踪中使用 SVM 技术时需要注意以下几个问题:

- (1)核函数的选择。核函数的选择决定了 SVM 的性能,

然而针对分类器核函数选择的研究是非常困难的。

(2)训练速度和数据规模。训练支持向量机需要解决两个编程问题,即计算复杂度很高及内存需求量大。虽然 Platt<sup>[82]</sup>和 Keerthi<sup>[83]</sup>提出最小优化顺序方法(SMO)来提高支持向量机的训练,但该方法仍有很大的改进空间。

(3)多类别分类问题。在多目标跟踪中,SVM分类器需要对多类别进行分类,但在这个方向上 SVM分类器还不是很完善。

#### 4.2 贝叶斯分类器

从统计的角度来说,用核密度估计的方式来估计密度需要大量的样本,而在目标识别中往往训练样本是很有限的,也是很不够的。用核密度估计的方式来估计类内的条件概率是很不准确的<sup>[84]</sup>。但是可以从另外一个角度来观察它的可行性。基于核密度估计的贝叶斯分类器可看成一个加权的近邻分类器,用核函数来调节权值的大小。对离目标样本点越近的点赋予越大的权值,反之相反。影响分类器性能的就是核函数的形态和核半径的大小。在核函数给定的情况下,如何确定核半径的大小?在大多数应用中都是通过训练样本来估计它,因此与其他的学习方法类似,如果训练样本越充分,得到的结果就会越好。

贝叶斯分类器利用对象的先验概率,由贝叶斯公式得到其后验概率,该对象所属的类即为具有最大后验概率的类。目前,主要有4种类型的贝叶斯分类器,分别为 Naive Bayes<sup>[85]</sup>, TAN<sup>[86]</sup>, BAN<sup>[86]</sup>和 GBN<sup>[87]</sup>。其中,朴素贝叶斯具有坚实的数学基础及良好的分类性能,朴素贝叶斯模型需要估计的参数很少,算法也不复杂,这些优点使其成为应用最广泛的分类模型。

文献[88]根据贝叶斯决策规则和梯度变化的特点,提出了基于贝叶斯框架的视频目标检测算法。使用视频开始的前少量帧进行背景建模,然后利用贝叶斯规则来判断每个像素点属于前景或者背景的概率,从而对视频流进行初步的前景分割。该算法在光照变化大的条件时有较好的目标跟踪效果。文献[89]利用贝叶斯概率进行目标识别,从而检测红外图像中的运动目标。在初始帧中使用相关算法得到目标的初始位置,并分析了当前目标识别特性。计算当前帧中连通区域的概率,并由此判别目标和背景。在当前帧中的目标位置确定后,使用更新模式向量来识别下一帧中的目标。该方法计算量小,能快速实现,但是对于目标快速机动等情况下的鲁棒性还有待改进。文献[90]将贝叶斯方法应用于接力跟踪,利用系统已经获得的目标运动信息的先验知识来提高系统的跟踪性能。

**结束语** 本文对基于在线学习的目标跟踪方法进行了比较全面的介绍,对3类主要的算法进行了分析。目前,长时间的目标跟踪仍然存在很多问题,还需要进行大量的研究。当然也出现了一些实时性较好的算法,可以将其应用到对帧频要求不高的系统。但是,对其它方法仍需进一步研究,以降低其对算法复杂度和存储空间的要求。机器学习是一个十分活跃、充满生命力的研究领域,相信通过众多学者的共同努力,更多符合人工智能的学习型目标跟踪方法会不断涌现。从目前的研究情况来看,在线学习目标跟踪方法将会持续成为研究热点,并且随着研究的不断深入和计算机技术的发展,应用到实时系统的方法也会越来越多。

#### 参考文献

- [1] Zhang S P, Yao H X, Sun X, et al. Sparse coding based visual tracking: review and experimental comparison[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(7): 1772-1788
- [2] Yilmaz A, Javed O, Shah M. Object tracking: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2006, 38(4): 81-93
- [3] Hou Zhi-qiang, Han Chong-zhao. A survey of visual tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(4): 603-617(in Chinese) 侯志强,韩崇昭.视觉跟踪技术综述[J].自动化学报,2006,32(4):603-617
- [4] Zou Hai-rong, Gong Zhen-bang, Luo Jun. The status quo and prospect of tracking system of ground moving object by UAV [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(z1): 233-236(in Chinese) 邹海荣,龚振邦,罗均.无人飞行器地面移动目标跟踪系统研究现状与展望[J].宇航学报,2006,27(z1):233-236
- [5] Li Wan-Yi, Wang Peng, Qiao Hong. A Survey of Visual Attention Based Methods for Object Tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(4): 561-576(in Chinese) 黎万义,王鹏,乔红.引入视觉注意机制的目标跟踪方法综述[J].自动化学报,2014,40(4):561-576
- [6] Chen X. Salient Object Detection Base on Visual Salient Feature [D]. Jilin: Jilin University, 2013: 21-37(in Chinese) 陈霄.基于视觉显著特征的目标检测方法研究[D].吉林:吉林大学,2013:21-37
- [7] Yao J, Odobez J M. Multi-Layer Background Subtraction Based on Color and Texture [C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1-8
- [8] Dalley G, Migdal J, Eric W, et al. Background Subtraction for Temporally Irregular Dynamic Textures [C] // Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2008: 1-7
- [9] Seki M, Wada T, Fujiwara H, et al. Background Subtraction Based on Co-occurrence of Image Variations [C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, 2: 65-72
- [10] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-577
- [11] Cui Wen-chao, Jin Gang, Liu Jian. Tracking algorithm for extended target of gray imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(7): 18-22(in Chinese) 崔文超,金钢,柳建.一种灰度成像扩展目标跟踪方法[J].光电工程,2005,32(7):18-22
- [12] Dalal N, Triggs B. Histogram of oriented gradients for human detection [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, 2005: 886-893
- [13] Stauffer C, Grimson W E L. Adaptive background mixture models for real-time tracking [C] // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Fort Collins: IEEE Computer Society Press, 1999, 2: 246-252
- [14] Jain R, Nagel H. On the analysis of accumulative difference pictures from image Sequences of real world scenes [J]. IEEE Trans. patt. Analy. Maeh. Intell, 1979, 1(2): 206-214
- [15] Wren C, Asarbajani A, Pentland A. Pfunder: Real-time tracking of the human body [J]. IEEE Trans. Patt. Analy. Maeh. Intell, 1997, 19(7): 780-785

- [16] Stauffer C, Grimson W. Learning patterns of activity using real time tracking[J]. IEEE Trans. Patt. Anal. Maeh. Hitell, 2000, 22(8):747-767
- [17] Kornprobst P, Deriche R, Aubert G. Image Sequence Analysis via Partial Differential Equations[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 1999, 11(1):5-26
- [18] Tian Y L, Lu M, Hampapur A. Robust and Efficient Foreground Analysis for Real-time Video Surveillance[C]// IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005:1182-1187
- [19] Li X H, Fan H. Linear Predication Methods for Blind Fractionally Spaced Equalization[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(6):1667-1675
- [20] Moravec H. Visual mapping by a robot rover[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1979:598-600
- [21] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C]// Proceedings of Fourth Alvey Vision Conference. Manchester: IEEE, 1988:147-152
- [22] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110
- [23] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3):346-359
- [24] Engin T, Vincent L, Pascal F. DAISY: An efficient dense descriptor applied to wide-baseline stereo[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(5):815-830
- [25] He Qing, Li Ning, Luo Wen-juan, et al. A Survey of Machine Learning Algorithms for Big Data [J]. PR&AI, 2014, 27(4):327-336(in Chinese)  
何清, 李宁, 罗文娟, 等. 大数据下的机器学习算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(4):327-336
- [26] Yan You-biao, Chen Yuan-yan. A Survey on Machine Learning and Its Main Strategy[J]. Application Research of Computers, 2004, 21(7):4-13(in Chinese)  
闫友彪, 陈元琰. 机器学习的主要策略综述[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(7):4-13
- [27] Jiang Fang-chun, Tian Sheng-feng, Yin Chuan-huan. A survey on the confidence machismo research in machine learning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(3):111-117(in Chinese)  
蒋方纯, 田盛丰, 尹传环. 机器学习置信度机制研究综述[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(3):111-117
- [28] Oza N C. Online bagging and boosting[C]// Proceedings of the 8th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001:105-112
- [29] Kearns M, Valiant L. Cryptographic limitations on learning boolean formulae and finite automata [J]. Journal of the ACM, 1994, 41(1):67-95
- [30] Schapire R E. The strength of weak learnability[J]. Machine Learning, 1990, 5(2):197-227
- [31] Drucker H, Schapire R, Simard P. Boosting performance in neural networks[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1993, 7(4):705-719
- [32] Oza N, Russell S. Online bagging and boosting[C]// Proc. Artificial Intelligence and Statistics. 2001:105-112
- [33] Littlestone N. Leaning quickly when irrelevant attributes abound: A new linear threshold algorithm[J]. Machine Learning, 1988, 2(4):285-318
- [34] Littlestone N, Warmuth M. The weighted majority algorithm [J]. Information and Computation, 1989, 108(2):212-261
- [35] Sun Lai-bing, Chen Jian-mei, Song Yu-qing, et al. Improved target tracking method based on on-line Boosting[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(2):495-498(in Chinese)  
孙来兵, 陈健美, 宋余庆, 等. 改进的基于在线 Boosting 的目标跟踪方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(2):495-498
- [36] Ma Xian-bing, Sun Shui-fa, Qin Yin-shi, et al. Object Tracking Algorithm of On-line Boosting Based on Particle Filter[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2013, 31(3):100-105(in Chinese)  
马先兵, 孙水发, 覃音诗, 等. 基于粒子滤波的 on-line boosting 目标跟踪算法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(3):100-105
- [37] Chen Si, Su Song-zhi, Li Shao-zi, et al. A Novel Co-training Object Tracking Algorithm Based on Online Semi-supervised Boosting [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(4):888-895(in Chinese)  
陈思, 苏松志, 李绍滋, 等. 基于在线半监督 boosting 的协同训练目标跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4):888-895
- [38] Yan Jia, Wu Min-yuan. On-line boosting based target tracking under occlusion[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2):439-446(in Chinese)  
颜佳, 吴敏渊. 遮挡环境下采用在线 Boosting 的目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):439-446
- [39] Freund Y, Schapire R E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to Boosting[J]. Journal of Computer and System Sciences, 1997, 55(1):119-139
- [40] Freund Y, Schapire R E. Experiments with a new Boosting algorithm [C]// Proceedings of the 13th Conference on Machine Learning. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 1996:148-156
- [41] Cao Ying, Miao Qi-guang, Liu Jia-chen, et al. Advance and Prospects of AdaBoost Algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6):745-758(in Chinese)  
曹莹, 苗启广, 刘家辰, 等. Adaboost 算法研究进展与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(6):745-758
- [42] Grabner H, Grabner M, Bischof H. Real-time tracking via on-line boosting [C]// Proceedings British Machine Vision Conference (BMVC). Edinburgh, 2006:47-56
- [43] Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 57(2):137-154
- [44] Liu Qing-shan. Study on Face Tracking and Recognition[D]. Institute of Automation, Chinese Academic of Sciences, 2003:35-45(in Chinese)  
刘青山. 人脸跟踪与识别的研究[D]. 中国科学院研究生院(自动化研究所), 2003:35-45
- [45] Yan X S, Luo Y P. Recognizing human actions using a new descriptor based on spatial-temporal interest points and weighted output classifier[J]. Neurocomputing, 2012, 87(1):51-61
- [46] Chen S, Wang J Q, Ouyang Y, et al. Boosting part-sense multi-feature learners toward effective object detection[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(3):364-374
- [47] Rios-Cabrera R, Tuytelaars T, Van Gool L. Efficient multi-camera vehicle detection, tracking, and identification in a tunnel sur-

- veillance application[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2012, 116(6): 742-753
- [48] Qian Zhi-ming, Yang Jia-kuan, Duan Lian-xin. Research Advances in Video-based Vehicle Detection and Tracking[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(S2): 222-227(in Chinese)  
钱志明, 杨家宽, 段连鑫. 基于视频的车辆检测与跟踪研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S2): 222-227
- [49] Saon G, Soltau H. Boosting systems for large vocabulary continuous speech recognition[J]. Speech Communication, 2012, 54(2): 212-218
- [50] Park J, Diehl F, Gales M J F, et al. The efficient incorporation of MLP features into automatic speech recognition systems[J]. Computer Speech & Language, 2011, 25(3): 519-534
- [51] Zhu Yi-qiang, Zhang Hong-cai, Cheng Yong-mei, et al. AdaBoost based Real-time Pedestrian Detection System [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(11): 1642-1645(in Chinese)  
朱谊强, 张洪才, 程咏梅, 等. 基于 Adaboost 算法的实时行人检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(11): 1642-1645
- [52] Zhu Jian-xiang, Su Guang-da, Li Ying-chun, et al. Facial Expression Recognition Based on Gabor Feature and Adaboost[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(8): 993-998 (in Chinese)  
朱健翔, 苏光大, 李迎春, 等. 结合 Gabor 特征与 AdaBoost 的人脸表情识别[J]. 光电子激光, 2006, 17(8): 993-998
- [53] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32
- [54] Saffari A, Leistner C, Santner J, et al. Online Random Forests [M]. Online Learning for Computer Vision Workshop, 2009
- [55] Lepetit V, Fua P. Key point recognition using randomized trees [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9): 1465-1479
- [56] Gall J, Lempitsky V. Class-specific hough forests for object detection [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009: 1-8
- [57] Fanelli G, Dantone M, Gall J, et al. Random forests for real time 3Dface analysis [J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 101(3): 437-458
- [58] Shotton J, Fitzgibbon A, Cook M, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011: 1297-1304
- [59] Chen Shu, Peng Xiao-ning. Object tracking based on particle filter and online random forest classification[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2014, 35(2): 207-213 (in Chinese)  
陈殊, 彭小宁. 基于粒子滤波和在线随机森林分类的目标跟踪[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 207-213
- [60] Shu Xiang. Research of Object Tracking Based on Random Forest[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 13-27(in Chinese)  
舒翔. 基于随机森林的目标跟踪算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 13-27
- [61] Gu Xing-fang. Research and Application of visual tracking Based on Random Forest[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013: 33-40(in Chinese)  
顾幸方. 基于随机森林的视觉跟踪算法研究及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 33-40
- [62] Wang A P, Wan G W, Cheng Z Q, et al. Incremental learning extremely random forest classifier for online learning[J]. Journal of Software, 2011, 22(9): 2059-2074(in Chinese)  
王爱平, 万国伟, 程志全, 等. 支持在线学习的增量式极端随机森林分类器[J]. 软件学报, 2011, 22(9): 2059-2074
- [63] Gall J, Yao A, Razavi N. Hough Forests for Object Detection, Tracking, and Action Recognition [J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. , 2011, 33(11): 2188-2202
- [64] Blum A, Mitchell T. Combining labeled and unlabeled data with co-training[C]//Proceedings of the 11th Annual Conference on Computational Learning Theory (COLT' 98). Wisconsin, MI, 1998: 92-100
- [65] Zhou Z H, Li M. Tri-training: Exploiting unlabeled data using three classifiers[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(11): 1529-1541
- [66] Qi Zhi-quan, Song Ye, Wang Lai-sheng. Object tracking research based on on-line learning[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(2): 770-774(in Chinese)  
齐志泉, 宋野, 王来生. 基于在线学习的目标跟踪方法研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 770-774
- [67] Li Shan-qing, Tang Liang, Liu Ke-yan, et al. A Fast and Adaptive Object Tracking Method[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(2): 383-391(in Chinese)  
李善青, 唐亮, 刘科研, 等. 一种快速的自适应目标跟踪方法[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(2): 383-391
- [68] Zhu Jian-zhang. Studies on Real-time Visual Object Tracking in Complex Environment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 19-29(in Chinese)  
朱建章. 复杂场景下实时视觉目标跟踪的若干研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 19-29
- [69] Grabner H, Leistner C, Bischof H. Semi-supervised on-line boosting for robust tracking[C]//Proceedings European Conference on Computer Vision (ECCV). Marseille, 2008: 234-247
- [70] Babenko B, Yang M H, Belongie S. Robust object tracking with online multiple instance learning[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(8): 1619-1632
- [71] Li Na, Li Da-xiang, Liu Wei-hua, et al. Object tracking algorithms with multiple instance learning[J]. Journal of Xi An University of Posts and Telecommunications, 2014, 19(2): 43-47 (in Chinese)  
李娜, 李大湘, 刘卫华, 等. 基于多示例学习的目标跟踪算法[J]. 西安邮电大学学报, 2014, 19(2): 43-47
- [72] Su Qiao-ping, Liu Yuan, Bo Ying-qiao, et al. Multiple Instance Learning Target Tracking Algorithm Based on Sparse Representation[J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 213-217 (in Chinese)  
苏巧平, 刘原, 卜英乔, 等. 基于稀疏表达的多示例学习目标跟踪算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 213-217
- [73] Luo Yan, Xiang Jun, Yan Ming-jun, et al. Online Target Tracking Based on Multiple Instance Learning and Random Ferns Detection[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(7): 1605-1611(in Chinese)  
罗艳, 项俊, 严明君, 等. 基于多示例学习和随机蕨丛检测的在线目标跟踪[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1605-1611
- [74] Kalal Z, Matas J, Mikolajczyk K. P-N Learning: Bootstrapping Binary Classifiers by Structural Constraints[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Press, 2010: 49-56

- tion[J]. *Statistics and Computing*, 1991, 1(2): 93-103
- [19] Islam A, Inkpen D. Real-word spelling correction using Google Web IT 3-grams[C]// *Proceedings of the 2009 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Volume 3. 2009: 1241-1249
- [20] Shi De-sheng, Wang Liang-zhi, Chen Zhi-da, et al. A Statistics-based Approache for Automatic Detecting Errors in Chinese Text[J]. *Computer and Communications*, 1992, 8: 19-26 (in Chinese)  
施得胜, 王良志, 陈志达, 等. 基于统计的中文错字侦测法[J]. *电脑与通讯*, 1992, 8: 19-26
- [21] Zhang Zhao-huang. Automatic Error Detection and Correction of ChineseText[J]. *Communications of COLIPS*, 1994, 4(2): 143-149 (in Chinese)  
张照煌. 中文错别字自动订正方法初探[J]. *Communications of COLIPS*, 1994, 4(2): 143-149
- [22] Zhang L, Zhou M, Huang C, et al. Multifeature-based approach to automatic error detection and correction of Chinese text[C]// *Proceedings of the First Workshop on Natural Language Processing and Neural Networks*. 1999
- [23] Ma Jin-shan, Zhang Yu, Liu Ting, et al. Detecting Chinese Text Errors Based on Trigram and Dependency Parsing[J]. *Journal of the China Society for Scintific and Technical Information*, 2005, 23(6): 723-728 (in Chinese)
- 马金山, 张宇, 刘挺, 等. 利用三元模型及依存分析查找中文文本错误[J]. *情报学报*, 2005, 23(6): 723-728
- [24] Zhang Yang-sen, Cao Yuan-da, Yu Shi-wen. A Hybrid Model of Combining Rule-based and Statistics-based Approaches for Automatic Detecting Errors in Chinese Text[J]. *Journal of Chinese Information Processing*, 2006, 20(4): 1-7 (in Chinese)  
张仰森, 曹元大, 俞士汶. 基于规则与统计相结合的中文文本自动查错模型与算法[J]. *中文信息学报*, 2006, 20(4): 1-7
- [25] Wu Lin, Zhang Yang-sen. Reasoning Model of Multi-level Chinese Text Error-detecting Based on Knowledge Bases[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(20): 21-25 (in Chinese)  
吴林, 张仰森. 基于知识库的多层级中文文本查错推理模型[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(20): 21-25
- [26] Liu Liang-liang, Wang Shi, Wang Dong-sheng, et al. Automatic Text Error Detection in Domain Question Answering[J]. *Journal of Chinese Information Processing*, 2013, 27(3): 77-83 (in Chinese)  
刘亮亮, 王石, 王东升, 等. 领域问答系统中的文本错误自动发现方法[J]. *中文信息学报*, 2013, 27(3): 77-83
- [27] Shi Heng-li, Liu Liang-liang, Wang Shi, et al. Research on Method of Constructing Chinese Character Confusion Set[J]. *Computer Science*, 2014, 41(8): 229-232, 253 (in Chinese)  
施恒利, 刘亮亮, 王石, 等. 汉字种子混淆集的构建方法研究[J]. *计算机科学*, 2014, 41(8): 229-232, 253

(上接第7页)

- [75] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking Learning Detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7): 1409-1422
- [76] Zhou Xin, Qian Qiu-meng, Ye Yong-qiang, et al. Improved TLD visual target tracking algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(9): 1115-1123 (in Chinese)  
周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 等. 改进后的 TLD 视频目标跟踪方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(9): 1115-1123
- [77] Dong Yong-kun, Wang Chun-xiang, Xue Lin-ji, et al. Pedestrian Detection and Tracking Based on TLD Framework[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2013, 41(S): 226-228 (in Chinese)  
董永坤, 王春香, 薛林继, 等. 基于 TLD 框架的行人检测和跟踪 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(S): 226-228
- [78] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks [J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297
- [79] Avidan S. Support Vector Tracking[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(8): 1064-1072
- [80] Song Hua-jun. Study on Target Tracking Method Based on SVM[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Academia Sinica, 2006: 30-42 (in Chinese)  
宋华军. 基于支持向量机的目标跟踪技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2006: 30-42
- [81] Tian Q, Hong P, Huang T S. Update relevant image weights for content-based image retrieval using support vector machines[C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. 2000: 1199-1202
- [82] Platt J. Sequential minimal optimization: A fast algorithm for training support vector machines [C]// *Advances in Kernel Methods—Suport Vector Learning*. 1998: 212-223
- [83] Keerthi S S, Shevade S K, Bhattacharyya C, et al. Improvements to Platt's SMO algorithm for SVM classifier design[J]. *Neural Computation*, 2001, 13(3): 637-649
- [84] 机器学习 10 大经典算法[OL]. [http://www.360doc.com/content/11/1102/14/4404107\\_161074278.shtml](http://www.360doc.com/content/11/1102/14/4404107_161074278.shtml) Ten Classical algorithms in Machine Learning. [http://www.360doc.com/content/11/1102/14/4404107\\_161074278.shtml](http://www.360doc.com/content/11/1102/14/4404107_161074278.shtml)
- [85] Zhang H, Sheng S. Learning weighted naive Bayes with accurate ranking [C]// *Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Data Mining*. IEEE Computer Society, 2004: 567-570
- [86] Friedman N, Geiger D, Goldszmidt M. Bayesian network classifiers[J]. *Machine Learning*, 1997, 29(2/3): 131-163
- [87] Laskey K B, Pradeeds H. Comparing Bayesian network classifiers[C]// *Proc. of the 15th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999: 101-108
- [88] Mai Hua-an. Research on Object Detection and Tracking Algorithm Based on Bayesian Framework [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 11-21 (in Chinese)  
麦华岸. 基于贝叶斯框架的目标检测跟踪算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 11-21
- [89] Xu Jing, Wang Xiao-feng. Recognition method of moving target using Bayesian probability theory[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013, 37(1): 76-80 (in Chinese)  
许敬, 王晓锋. 基于贝叶斯概率的运动目标识别方法[J]. *南京理工大学学报*, 2013, 37(1): 76-80
- [90] Xia Shuang-zhi, Liu Hong-wei, Jiu Bo. A Method of Relay of Tracking Based on Bayesian Theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 652-658 (in Chinese)  
夏双志, 刘宏伟, 纠博. 基于贝叶斯理论的一种接力跟踪方法 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 652-658