

中国科学技术大学

学士学位论文



面向移动服务机器人的行人追踪跟随的研究与实现

作者姓名： 韦清

学科专业： 计算机科学与技术

导师姓名： 陈小平 教授

完成时间： 二〇一九年五月二十一日

University of Science and Technology of China
A dissertation for bachelor's degree



**Research and Implementation of
People Tracking and Following with
Mobile Service Robots**

Author: Qing Wei

Speciality: Computer Science and Technology

Supervisor: Prof. Xiaoping Chen

Finished time: May 21, 2019

目 录

中文内容摘要	3
英文内容摘要	4
第 1 章 绪论	5
1.1 研究背景及意义	5
1.2 相关工作	5
1.3 论文结构	6
第 2 章 视觉行人追踪算法	7
2.1 行人检测	7
2.1.1 常用人工特征描述子	8
2.1.2 分类器	14
2.2 基于动态的追踪	16
2.2.1 Boosting 算法	16
2.2.2 卡尔曼滤波	17
2.2.3 粒子滤波	18
2.2.4 均值漂移算法	18
2.2.5 相关滤波	19
2.2.6 GOTURN	21
2.2.7 TLD	21
第 3 章 ROS 上的机器人导航算法	24
3.1 ROS 导航	24
3.1.1 坐标系转换	24
3.1.2 里程计	24
3.1.3 建图	25
3.1.4 定位	25
3.1.5 导航控制	25
3.2 可佳导航	26

第 4 章 以可佳机器人为基础的行人追踪与系统	27
4.1 视觉行人追踪系统	27
4.1.1 总体架构	27
4.1.2 系统测试实验结果	30
4.2 行人定位与机器人导航	32
第 5 章 总结	33
参考文献	34

中文内容摘要

随着人工智能与物联网技术迅速发展，个人或家庭用机器人、公共服务机器人的应用场景、服务模式和市场也在不断拓展，成为了当下的一个研究热点。为了精准理解当前环境和有效执行指令，能够精确可靠地自动识别目标人物并对其进行追踪陪同，是这类移动服务机器人的人机交互中的一项重要且必要的功能。行人跟随功能可以用于在博物馆或医院等场景中对用户进行指引，在家庭中陪伴用户、与用户进行交互，助老、助残等，在投入应用后，可以有效减少在这些场景中的人工成本，便捷用户的生活和工作。

本文主要介绍并实现了一个能够长期稳定运行的视觉行人追踪系统，同时也涉及了在此基础上搭建机器人对使用者的跟随陪同系统的方法。本文通过对现有行人检测和追踪方法的调研和对比实验，根据所需的应用场景，设计了一个根据视觉图像的、结合了以相关滤波为基础的行人追踪器和以人工特征和机器学习分类器为基础的行人检测器的视觉追踪系统。并利用 Kinect 深度相机，从视觉图像中得到目标所在位置，调用 ROS 导航或可佳导航系统，实现对于目标行人的跟随。

关键词：计算机视觉；机器人；行人检测；目标追踪

Abstract

With the rapid development of artificial intelligence and Internet of Things, the application scenarios, service patterns and market of service robots are also continuously expanding, thus making the service robots a focused area in Robotics research. In order to accurately understand the current environment and effectively execute the instructions, one of the important and necessary ability for a personal service robot, is to automatically recognize and track a person precisely and robustly.

This paper mainly introduces and implements a long-term visual pedestrian tracking system, and addresses the people-following system on a service robot based on it. By investigating and researching on current pedestrian detection and object tracking algorithms, we propose a visual-based tracking system, combining a correlation filter tracker and a machine learning classifier. The people-following system will make use of the Kinect depth image to locate the target people, and employ the ROS navigation or Kejia navigation system to conduct the following behavior.

Key Words: Computer Vision; Robotics; Pedestrian Detection; Object Tracking

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

服务机器人是一种半自助或全自主工作的机器人。它能完成有益于人类的服务工作（不包括从事生产的设备），可以在真实且不可预测的环境中自动进行决策和行动来完成确定的任务。服务机器人分为个人/家庭服务机器人和专业机器人。专业机器人一般在特定场景中使用，如商业服务、物流、医疗、救援等；而个人/家用服务机器人主要在日常生活场景中与人进行交互，提供家政服务、陪伴、娱乐、辅助学习等多种功能，包括家政机器人、娱乐休闲机器人、助老助残机器人等。其中，个人/家庭服务机器人为本文研究内容的应用对象。

随着人工智能与物联网技术不断成熟，服务机器人作为智能硬件之一，其应用场景和服务模式也在不断拓展。为了精准理解当前环境和有效执行指令，能够精确可靠地自动识别目标人物并对其进行追踪陪同，是这类移动服务机器人的机人交互中的一项重要且必要的功能。这项功能可以用于在博物馆或医院等场景中对用户进行指引，在家庭中陪伴用户、与用户进行交互，助老、助残等，在投入应用后，可以有效减少在这些场景中的人工成本，便捷用户的生活和工作。

移动机器人的核心技术包括导航定位、地图创建、路径规划、任务分配和目标跟踪等。在本文中，会主要介绍目标跟踪，尤其是其中的行人定位模块，通过对 ROS 导航的简要介绍涉及机器人导航定位、地图创建、路径规划的大致概念，并最终实现一个有简单导航模块和较为鲁棒的行人追踪模块的机器人系统。

1.2 相关工作

自从有了服务机器人的概念以来，就有很多对于机器人目标跟随技术的研究。移动机器人由于可携带多种传感器，由此衍生了各种使用了传感器的行人识别和追踪方法。如使用视觉图像、激光传感器、热成像传感器^[1]、声音传感器^[2]等，由于单一传感器信息较少，也出现了不少多传感器融合信息的行人定位方式^[3]。

激光传感器由于还被广泛运用到机器人的定位、建图、导航中，是机器人最为重要的传感器，所以也常常被运用到行人跟随的任务中。不过激光传感器由于成本限制，多使用 2D 激光来检测同一水平面的物体，竖直空间上可以检测到的

范围有限，所以激光行人追踪的方法最为经常使用的特征是行人的双腿^[4]。在激光图像中，人的双腿会有一种明显的模式，与背景区分开，通过滤波器抽取人的腿部特征，进行聚类，便可得到一个人腿模式识别器，再结合粒子滤波或卡尔曼滤波等技术，便可以实现对行人腿部的持续追踪。但这种识别器在有遮挡时，或暂时失去目标后，无法准确地重新建立对目标的追踪。此外，从人腿信息中基本不可能对不同行人加以区分，所以为了系统的鲁棒性，行人腿部识别通常还是需要加入视觉信息，如结合面部识别，来进行一些情况下的行人的区分^[5-6]。

视觉行人追踪领域已有很多研究，是计算机视觉领域中的一个重要研究对象。在机器人跟随用户的任务中使用视觉行人追踪，已有方法中包括了对行人的面部识别^[7-8]（要求行人必须面对相机），衣着识别^[9-10]（主要通过对衣着颜色特征的提取），身体轮廓识别^[11]（使用 HOG、边缘描述子等特征），行人步态识别^[12-13]等。根据服务机器人的主要使用场景，为了系统的稳定性和鲁棒性，在本文的系统实现中，会对行人检测和追踪常用的特征进行分析，选择合适的特征和追踪器，使用视觉行人追踪得到人物在 RGB 图像中的位置，再结合 RGB-D 相机的深度图像，得到目标行人在地图中的 3D 坐标。

1.3 论文结构

本文将针对室内移动机器人的行人跟随问题做如下三个方面的研究：

(1) 常用目标追踪算法的原理与实现：主要从行人检测和追踪两个角度进行调研论述。主要介绍了用于行人检测的几个常用特征，如颜色直方图、LBP、HOG、SIFT 特征，基于机器学习的几种分类器，包括 KNN、SVM、RandomForest、AdaBoost，以及几种常用的追踪算法，包括卡尔曼滤波、粒子滤波、均值漂移、相关滤波等。

(2) ROS 上的机器人导航技术；主要包括 ROS 提供的 ROS 导航包，以及中科大研发的可佳机器人的导航功能。

(3) 可佳机器人上行人跟随系统的实现；结合行人的 HOG 特征和 HSV 直方图特征，使用 CSR-DCF 算法进行行人追踪，并单独训练一个 SVM 分类器以防止追踪器发生误判/漏判，以及帮助追踪器从追踪失败中恢复。并在数据集 TB-100^[14] 上检验了视觉行人跟随系统的性能。

第2章 视觉行人追踪算法

计算机视觉中的行人追踪，主要包括密集跟踪方法，即基于行人检测和识别的追踪，以及稀疏跟踪方法，即基于目标动态的追踪。

密集跟踪算法实际上并没有“跟踪”物体，而是在视频不同的时间点的一系列帧上扫描和检测物体的位置。由于每次的目标检测都是独立地在当前帧上进行的，所以每次检测时，都需要处理图像中的所有像素，所以用这种方法进行目标跟踪，计算量会比较大。此外，这种方法对分类器的要求也会较高，对于目标被遮挡的情况也不能很好地进行处理。

由于目标的运动通常是连续的，我们可以根据物体的动态信息，对其可能的运动轨迹进行预测，并结合其上一帧所在位置和对当前帧的观察，得出其当前位置，这就是稀疏跟踪方法。由于已知物体在上一帧时的位置，所以对当前帧识别时，只需要检测上一帧物体所在位置附近的像素，这样一来，相对于密集跟踪方法，就减少了大量的计算。此外，由于我们结合了对物体运动的预测和观察来进行估计，在一些情况下准确度也会较高，例如，当目标发生较大形变或被暂时遮挡时，目标检测很可能下会直接失败，但由于在追踪时我们还记录了物体最后出现的位置和对其行为的预测，所以可以在一定准确程度上继续追踪物体。但在这种算法在物体速度较快时，由于不会进行全图扫描，也可能会失去对物体的追踪，当目标物暂时从视野中消失一段时间时，可能难以重新找回物体。

比起基于检测的追踪，动态的目标追踪是在行人追踪任务中的主要方法，但行人检测在追踪算法中也是不可少的一环。下面将主要介绍在单张图像上的行人检测算法，和以此为基础的动态行人追踪。

2.1 行人检测

经典的行人检测方法包括提取人工特征，将待检测目标作为正样本，不含该目标的图像作为负样本，使用分类器进行分类，再在全图上进行匹配。此外还有使用卷积神经网络（convolutional neural networks）来提取图像特征或进行分类的方法，是现在行人检测研究的主要方向，但深度神经网络在目前还难以同时兼顾准确和实时性要求，此处主要介绍人工特征和支持向量机（Support Vector Machines, SVM）、Boosting 等分类器的使用。

2.1.1 常用人工特征描述子

特征描述子是一种对图片的表示方法，它通过提取图片中的关键信息并丢弃多余信息来对图片信息进行简化。通常地，特征描述子算法可以将一个 RGB 三通道的图片转化成一个特征向量。为了做到精确地进行图像识别、目标检测，我们必须首先明确什么是关键的、有用的信息，什么是冗余信息。在目标检测领域，有以下的常用特征描述子被提出，并都有过较为成功的应用。

1. 颜色直方图

颜色特征是物体最为直观的特征之一，它具有旋转不变性，且不受目标的大小和形状的变化影响，在颜色空间中分布大致相同，从而具有较高的鲁棒性。颜色直方图是描述颜色特征最常用的描述子，它是是对目标表面颜色分布的统计，描述了不同色彩在图像中所占的比例，具有稳定性好、抗部分遮挡、计算方法简单和计算量小等优点。但它无法描述图像中颜色的局部分布及每种色彩所处的空间位置，即无法描述图像中的某一具体的对象或物体，只是对一个图像块的颜色分布的统计，所以也有其使用局限性。

在行人检测领域，颜色直方图通常能够很好地描述行人的肤色或所着服饰的颜色，但在检测的时间段内，如果行人的衣着服饰发生改变，可能就会导致在接下来的时间检测失败。此外，杂乱的背景色和不同光照强度和颜色也会产生较大影响。

颜色直方图可以基于不同的颜色空间进行统计，其中，最常用的是 RGB 空间和 HSV 空间。数字图像一般都以 RGB 三通道形式进行存储，故这里首先以 RGB 空间为例。分别统计每个像素的 R、G、B 数值出现的频度，绘制出它们分别对应的直方图，以一张人物照片^{2.1}为例，图^{2.2}为其 RGB 分别对应的统计直方图。将直方图上每一个桶（bin）的高度作为一个分量，便可以得到一个统计向量，将 R、G、B 分别对应的直方图向量连接起来便可得到输入图像的 RGB 直方图特征向量。

虽然 RGB 图像被如此普遍地使用，但以 RGB 直方图作为图片的特征描述子却有一些缺点。首先，RGB 这三个重要的分量取值和其所生成的颜色之间的联系并不直观，即两种颜色在 RGB 空间中的距离无法描述它在人眼中的直觉色差。此外，使用 RGB 直方图的检测器容易受局部光照变化的影响而产生错误。所以在计算机视觉中，相比起 RGB 颜色空间，更常采用 HSV 颜色空间来表示颜色。HSV 是一种将 RGB 色彩空间中的点在圆柱坐标系中的表示方法，相对于

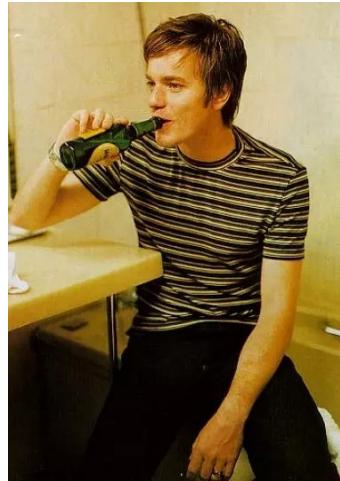


图 2.1 原图

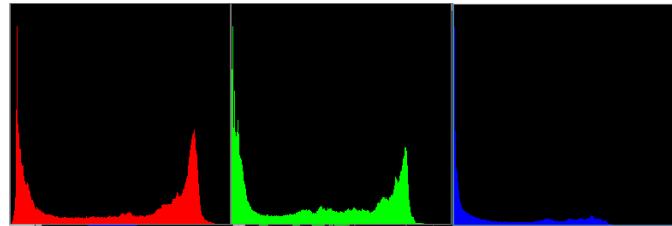


图 2.2 左: B 通道颜色直方图; 中: G 通道颜色直方图; 右: R 通道颜色直方图

RGB, 它能够更加直观地表示色彩的明暗、色调以及饱和度, 方便对于不同颜色进行对比。此外, 由于 HSV 单独提取了颜色的明暗, 也可以一定程度上抵抗光照明暗带来的影响。Sural et al.^[15] 的实验显示, 使用 HSV 直方图进行行人识别的结果比起 RGB 直方图可以有明显提高。

HSV 即色相 (Hue)、饱和度 (Saturation)、亮度 (Value)。色相即表示物体的颜色名, 取一个 0° 到 360° 的标准色轮, 按照该颜色位置的角度来度量色相, 即颜色点在圆柱坐标系中所在坐标的 φ 分量; 饱和度是指颜色的强度或纯度, 表示色相中灰色分量所占的比例, 即圆柱坐标系的 ρ 分量; 亮度是颜色的相对明暗程度, 即在圆柱坐标系中的 z 分量。这些颜色坐标一般都落在圆柱坐标系的一个圆锥体中, 如图2.3所示。

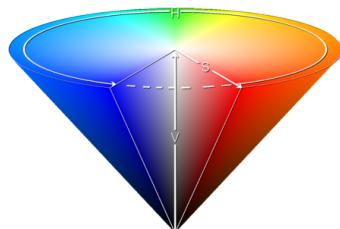


图 2.3 HSV 模型可以使用圆柱坐标系中的一个圆锥形子集表示

在计算 HSV 直方图时，需要首先把 RGB 空间坐标映射到 HSV 空间。给定 (r, g, b) 分别是一个颜色的红、绿、蓝坐标，它们的值是在 0 到 1 之间的实数， \max 为 r, g 和 b 之中的最大值， \min 为其中的最小值，则从 (r, g, b) 到 (h, s, v) 的转换公式如下：^[16]

$$h = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } \max = \min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ, & \text{if } \max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ, & \text{if } \max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ, & \text{if } \max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ, & \text{if } \max = b \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} 0, & \text{if } \max = 0 \\ \frac{\max-\min}{\max} = 1 - \frac{\min}{\max}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v = \max$$

HSV 直方图的计算与 RGB 类似，只是将颜色空间有所差异，我们同样使用图片2.1计算其 HSV 直方图，见图2.4。

2. 局部二值模式

局部二值模式（Local Binary Pattern, LBP）是一种用来描述图像局部纹理特征的特征描述子，具有旋转不变性和对光照变化不敏感等优点，由 Ojala et al.^[17] 在 1994 年首次提出。

LBP 的计算方法非常简单。每个像素都与它相邻的八个像素按指定的顺序（如顺时针、逆时针）作比较，来确定其特征值。对于中心像素大于某个相邻像素的，该像素对应的二进制位设置为 0，否则设置为 1，比较了中心点相邻的八个像素后，就得到了一个 8 位的二进制数，这个数字即为中心像素的特征值，计算过程如图2.5为例。图2.6为对图2.1的灰度图上的每个像素计算 LBP 值得到的 LBP 图谱，可以看出，LBP 特征受噪点影响较重，能够突出表现物体的表面纹理，也能在一定程度上表现出物体的边缘。

为了使得 LBP 描述子有旋转不变性，Ojala et al.^[18] 提出了一个 LBP 的具有旋转不变性扩展方法，即不断旋转其邻域，得到一系列的 LBP 值，取其最小值作为该点的局部二值模式值。

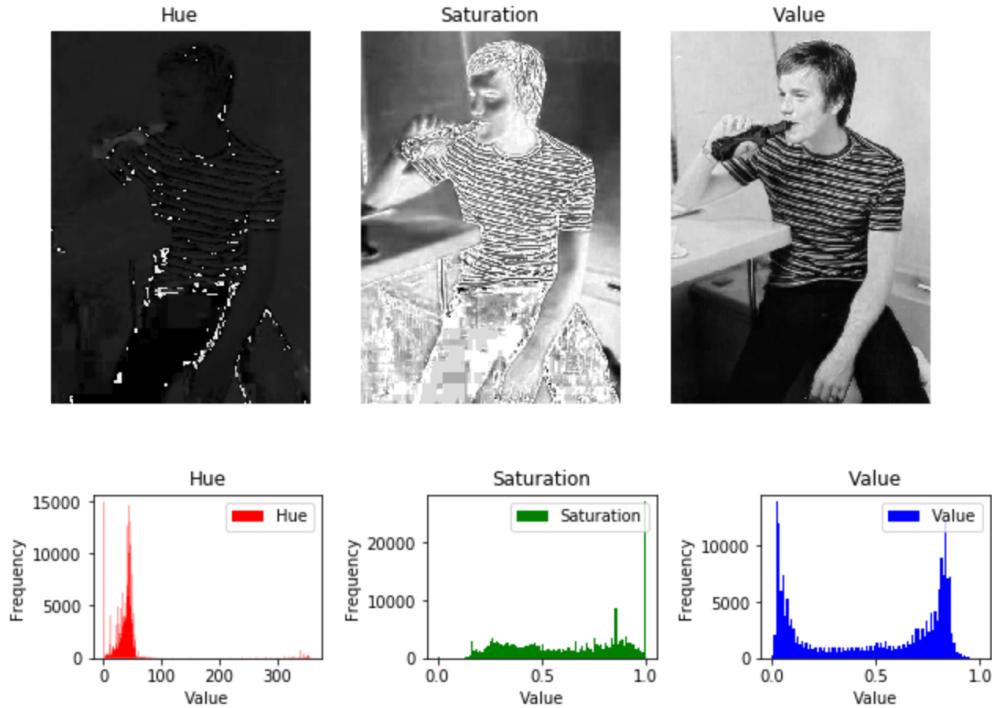


图 2.4 左: H 通道灰度图谱和颜色直方图; 中: S 通道灰度图谱和颜色直方图; 右: V 通道灰度图谱和颜色直方图

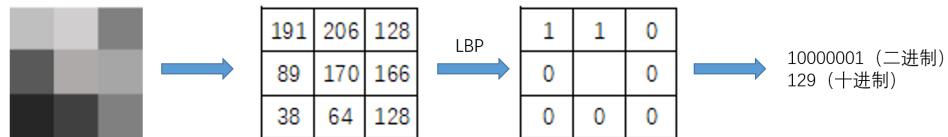


图 2.5 计算 3x3 像素块中心点的 LBP 值

在计算一个图片的 LBP 描述子时，首先将图片分成固定大小的单元格（如 16×16 像素），在计算出每个像素的 LBP 值后，统计每个单元格内的 LBP 值直方图，再串联所有单元格的直方图，即可得到该图片的 LBP 特征向量。

3. 方向梯度直方图

方向梯度直方图 (Histogram of Oriented Gradient, HOG) 是目前行人识别中最广泛使用的特征描述子之一。Dalal et al.^[19] 在 2005 年提出了由 HOG 特征结合 SVM 分类器进行行人检测的方法，在此之后，该方法被广泛应用到了图像识别领域中，并尤其在行人检测中获得了巨大的成功，也出现了很多改进和变体。

HOG 特征描述算法通过计算和统计图像局部区域的梯度方向来构成特征。由于在物体的边缘和角落处图片的颜色会进行突变，故在这些区域，梯度的幅值也会变大。一般来说，边缘和角落比起平坦区域包含更多关于物体形状的信息，而通过对边缘和角度的描述，HOG 正可以很好地描述局部目标的表面质地和形

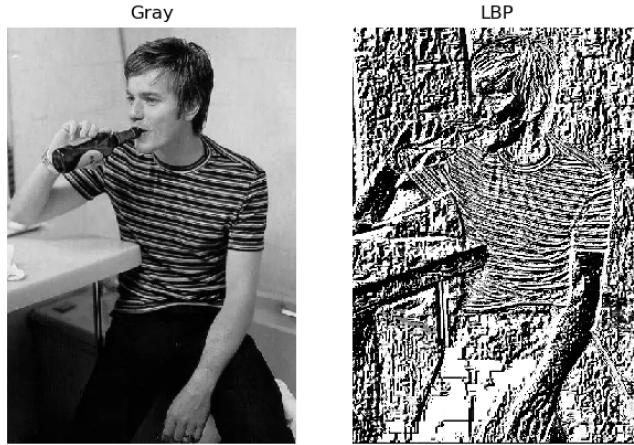


图 2.6 左: 灰度图; 右: 由灰度图计算得到的 LBP 图谱

状信息。但同时, 由于梯度的性质, HOG 特征描述子对噪点比较敏感, 且由于 HOG 主要描述了物体的轮廓, 所以很难处理遮挡问题。

为了计算方向梯度, 我们可以简单地使用核向量 (kernel) $[-1, 0, 1]$ 和 $[-1, 0, 1]^T$ 对原图进行卷积, 分别得到横向和纵向上的有向梯度。除了这种方法之外, 还可以使用 $[-1, 1], [1, -8, 0, 8, -1]$ 和 Sobel 算子等作为核向量, 不过根据 Dalal et al.^[19] 的实验, 使用最简单的 $[-1, 0, 1]$ 进行计算的梯度, 在以 HOG 为特征进行的图像识别中效果反而最佳。

在每个像素处, 方向梯度都具有大小和方向。对于彩色图像, 我们分别计算 RGB 三个通道的梯度。对原图片上的每个像素点 (x, y) , $f(x, y)$ 为其 R、G、B 值中的一个, 该通道上的横向和纵向方向梯度为:

$$g_x(x, y) = [-1, 0, 1] * f(x, y) = -f(x + 1, y) + f(x - 1, y),$$

$$g_y(x, y) = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} * f(x, y) = -f(x, y + 1) + f(x, y - 1)$$

由此便可得到有向梯度的幅值和方向:

$$\begin{aligned} |g(x, y)| &= \sqrt{g_x(x, y)^2 + g_y(x, y)^2} \\ \theta(x, y) &= \tan^{-1} \left(\frac{g_y(x, y)}{g_x(x, y)} \right) \end{aligned}$$

使用以上公式在 RGB 颜色空间上计算图2.1的梯度值大小, 如图2.7所示。可见, 这张梯度图谱已经省略了图中很多不必要的信息, 如颜色几乎一致的背景等, 且突出了人物的轮廓、五官、衣服的图案等用于识别的重要信息。

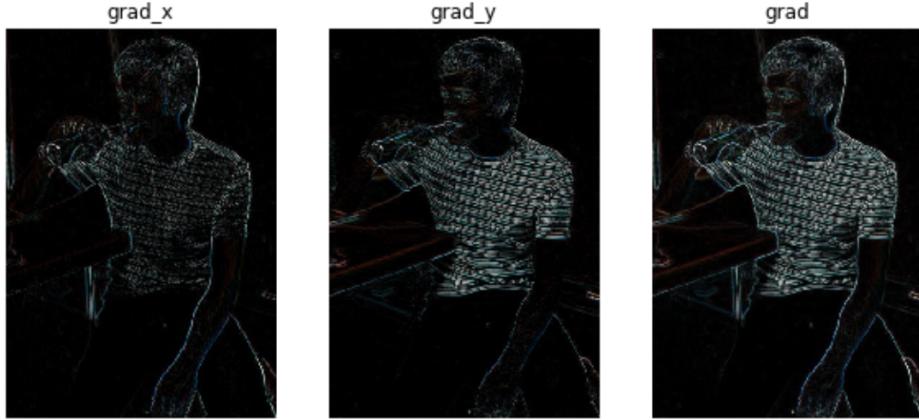


图 2.7 左：横向梯度绝对值；中：纵向梯度绝对值；右：梯度大小

此时在每个像素上得到的梯度有 3 个，分别对应原图的 RGB 分量，在计算 HOG 特征向量时，我们选取这三个通道的梯度幅度的最大值作为该点处的梯度大小，最大值对应的通道的梯度角度为该点处的梯度方向。

方向梯度直方图统计的即为梯度大小为权重的梯度方向。梯度的方向范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ，但是我们实际在统计方向时，采用的却是 $[0^\circ, 180^\circ]$ 的统计范围，通过计算 $\theta(x, y) \bmod 180^\circ$ 来代替原有的角度值，即把相差 180° 的两个角度视为同一个梯度方向。实验表明，这种统计方式得到的结果往往比采用 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围的原方向效果更好^[19]。

值得注意的是，由于图像的梯度是由各像素点周围的颜色值大小计算得到的，所以也会受光照的影响，例如，将所有像素值除以 2 来使图像变暗，这时所有梯度大小也会随之减半，梯度直方图每个 bin 的高度也会减半。而在一张图片中，每个局部区域的光照可能会有所不同，为了降低这些影响，在进行方向梯度统计时，并不会直接统计一整个图片的方向梯度直方图，而是以 8×8 像素的区域为一个单元格（cell）来分别进行统计，再在此基础上进行规范化（normalization）。这样会降低光照等噪音对特征描述子质量的影响，使 HOG 描述子更加稳定鲁棒。这个过程可以图2.8为例。

在进行规范化时，最常用的方法是在单元格的基础上取一个更大的块（block），每块的大小为 16×16 像素，即包括 4 个单元格，将每一个块的 4 个 HOG 向量作为一个整体进行 L2 规范化。即 $\mathbf{v} \leftarrow \mathbf{v} / \sqrt{\|\mathbf{v}\|_2^2 + \epsilon^2}$ ，其中 ϵ 是一个防止零除的足够小的正常数。以每个直方图取 9 个 bins 为例，在规范化一个块之后，我们得到了一个长为 $4 \times 9 = 36$ 的向量，即这个块最终的 HOG 向量。再以 8 像素的步长（stride）移动这个块，对下一个块进行规范化，即两个相邻块之

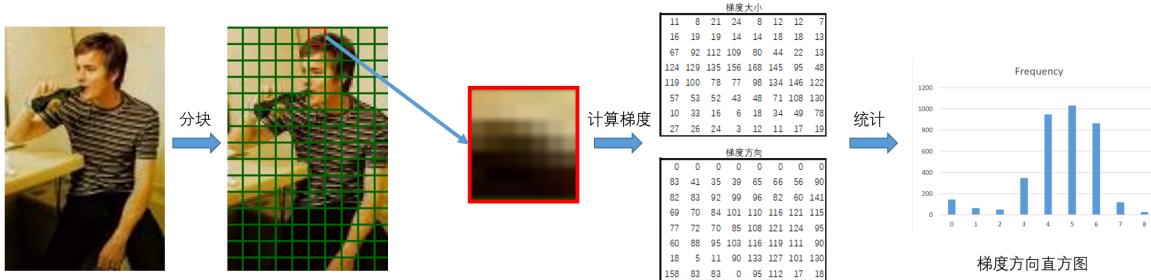


图 2.8 统计单元格梯度直方图的过程示意图

间有 2 个单元格的重叠。如此循环，直到整张图的每一个单元格都被计算，再将所有经过的块的向量合并在一起，作为整张图的 HOG 描述子。

4. 尺度不变特征变换

尺度不变特征变换 (Scale-invariant feature transform, SIFT) 是一种不受图片尺度和旋转影响，并在一定程度上不受光照和相机视角影响的特征描述子，它将图像数据转换为有关局部特征的尺度不变坐标。同时，通过在空间和频率域的准确定位，SIFT 还可以减少遮挡和噪音带来的干扰。SIFT 可以使用有效的算法从图片中提取出大量的独特特征，可以在几乎所有尺度和位置上密集地覆盖图像，例如，一个 500×500 像素的图像可以最多生成 2000 个稳定的特征点。SIFT 算法中独特的关键点描述方法，可以使单个特征从大型特征数据库中能得到高概率的匹配。但在较为杂乱的图像中，背景中的很多特征可能会生成错误的匹配，不过通过识别关于目标物及其在新图像中的位置，尺度和方向的关键点的子集，可以从完整匹配集中过滤出正确的匹配^[20]。

为了最大限度地降低提取特征的计算量，SIFT 使用级联过滤 (cascade filtering) 方法来检测关键点，先使用高效的算法使用弱分类器检测出一些候选位置，然后再进一步详细检测，将更加耗时的计算只在通过了初始测试的候选点位置上进行。但即使如此，SIFT 特征描述子的计算量仍难以在行人检测和追踪中满足实时性要求^[21]。故虽然 SIFT 特征描述子虽有诸多非常好的特性，但在有实时性要求的行人检测和追踪中并不常被使用。

2.1.2 分类器

分类器的作用是通过拟合一个从样本到标签的映射函数，将图像中的区域分类为目标对象或背景。分类器的训练需要正负样本，分别对应目标区域和背景区域。在对分类器进行一定规模的训练后，此时将一个图像上的区域块的特征向

量作为分类器的输入，分类器即会给出该区域包含目标物体的概率。

在实际使用时，得到了一个图像帧后，选取不同的检测窗口的大小，即尺度，然后以给定尺度的检测窗口扫描整个图像，计算每个检测窗口的特征向量，使用分类器得出其中包含目标物的概率，如果这个概率超过给定的阈值，则认为该检测窗口中即包括待追踪物体。

1. 最近邻算法

常用追踪器 TLD 中便采取了最近邻算法（K-Nearest Neighbors）作为级联分类器的最后一级。KNN 算法是从已有正确标签的样本集合中，找出与待分类特征向量最近的 k 个向量，以其中的多数的类别来决定该待测特征向量的分类。KNN 算法的思想非常简单，一般使用欧式距离或巴氏距离作为向量间距离的度量，但随着样本集变大，计算 k 个最近邻的计算量也会很大，变得相当耗时，此外，它对数据的局部结构也非常敏感，也没有考虑不同分量的权重。

2. 随机森林

随机森林是一个包含多个决策树的分类器。决策树作为常用的机器学习方法有其缺陷，即训练时容易出现过学习，在训练集上具有低偏差和高方差的特点。而随机森林将多个深决策树的结果进行平均以降低方差，每个深决策树都在一个数据集上的不同部分进行训练，由此提高决策树的性能。事实上，随机森林分类器和 K 近邻分类器十分相似，都可以被看作是“对邻居向量结果的加权”。与 KNN 算法不同，随机森林在决定类别时可以评估各个分量的重要性，且对于不平衡的分类数据集，可以平衡误差，学习过程也较为快速。但随机森林仍然存在过拟合的问题，对于取值划分较多的分量上评估的权值偏大。

3. 支持向量机

支持向量机（Support Vector Machine, SVM）是一个监督学习的分类器。为了减少计算量，在用于行人识别时，一般采用线性支持向量机。它在特征空间中通过训练拟合一个最优超平面，在预测时通过将样本和最优超平面进行比较，判断它出现在某一类别的概率。对于线性不可分的样本，通过使用非线性算法将数据从低维空间转化到高维空间使其线性可分，再从高维空间采用线性回归。

SVM 对于在线学习的支持并不算好，通常只在初始化时进行对模型的拟合。

4. AdaBoost

由于 SVM 计算量较大，为了提高速度，也可以使用 AdaBoost 代替。AdaBoost 是 Boosting 分类器的一种，即一种由几个弱分类器组成的级联分类器，每一个弱分类有一个权重，结合起来就是一个强分类器。每一级分类器都会排除一些可能

性较低的背景窗口，留下一些候选窗口传入下一级分类器进行计算。这样一来，在计算时大部分背景窗口在开始的几级分类器中就会很快被排除掉，剩下的很少一部分候选区域再通过后续的分类器，这样可以很大程度上提高整体运行速度。这里的弱分类器可以使用分类回归树、朴素贝叶斯模型、决策树桩等。

在训练初始化时，AdaBoost 给训练集的每个样本指定一个相同的权重，表明在训练时选取该样本进行学习的概率，接着调用弱分类器进行迭代学习，每次迭代后更新训练集上样本的权重，对于训练失败的样本赋予更大的权重，这样就使得下一轮的训练中，能够聚焦于那些更加难以分类、更富信息的样本上。

2.2 基于动态的追踪

在基于动态的追踪中，我们假定在此前的几乎所有帧中都已成功地跟踪了对象，并保有对其运动模式和之前位置的记录，目标是根据这些已有信息找到在当前帧中物体的位置。物体的运动模型给了一个它当前位置的粗略预测，此外，还需要根据该目标对象在先前的帧中的外观记录（即特征）对物体的位置进行更加精确的估计，我们仍可以使用在目标检测中提过的物体特征，如颜色直方图，HOG 等。根据这些外观的模型和特征，我们可以在由物体运动模型所预测的物体位置的邻域中进行搜索，以提高速度和准确度。根据外观进行分类的原理与目标检测相同，但如何将物体的运动模型等信息目标检测结合起来，就需要使用下面提到的几种算法。

2.2.1 Boosting 算法

在目标追踪中，我们常使用在线分类器进行目标识别，即在运行时即使训练的分类器。分类器的训练过程中，最初的正样本由使用者提供，在一张包含目标人物的图像中手动或使用某种检测算法选出一个框（bounding box, bbox）。分类器将该图像中的 bbox 作为正样本，在 bbox 之外取出若干个负样本进行训练拟合。

在收到下一帧后，在物体原位置的所有相邻的位置上运行分类器，取得分最高的一个 bbox 作为当前帧的物体位置，再以当前帧检测出的 bbox 作为正样本，背景中提取负样本继续训练分类器。Boosting 算法原理非常简单，相应地，追踪效果也比较平庸，由于它每次会选择得分最高的位置作为当前帧的检测结果，可能并不能选取到正确的目标位置，且容易出现漂移现象。

在 Boosting 算法的基础上, Babenko et al.^[22] 提出了多示例学习 (multiple instance learning, MIL) 算法。不同于传统的分类器将每一个实例进行分类的方法, MIL 将若干个实例归到一个包 (bag) 中, 即正样本包和负样本包。只要包中的一个图像是正样本, 就将其认为是正样本包, 相对的, 只有包中所有实例均为负样本, 才将其认为是负样本包。构建正样本包的方法是首先包含目标物在当前图像中的图像块, 并以此为中心, 将该位置周围的小邻域中的图像块都包括其中。这样以来, 即使被跟踪对象的当前位置不准确, 只要将目标物作为中心的图像块被作为邻域放入了正样本包中, 分类器就可以以它进行训练。

但 Boosting 和 MIL 算法都有着共同的缺点, 它们难以判断出是否已经对目标物失去了追踪而错误地选定了其他位置, 此外, 当目标物在一段时间内被遮挡的情况下, 它们都难以恢复追踪。

2.2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种假定目标物体的运动服从线性高斯分布, 以此对目标的运动状态进行预测, 将预测结果与观察模型进行比较, 根据误差更新预测模型, 估计物体的当前位置的方法。它不是单纯地在前一帧目标物位置周围作检测, 而是主动对其运动状态进行建模, 预测它即将出现的位置^[23]。

卡尔曼滤波分为两组方程: 时间更新方程和测量更新方程。时间更新方程根据当前状态和误差协方差估计, 预测下一时间的先验估计; 测量更新方程用于根据所获得的新的测量, 再结合先验估计来获取一个已优化的后验估计, 这个后验估计又被传回时间更新方程。如此循环, 完成一个预测-矫正的过程, 以自动化地对模型进行更新, 对状态进行估计。

时间更新方程包括:

$$\hat{x}_{k+1}^- = A_k \hat{x}_k + B u_k$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q_k$$

测量更新方程包括:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

Q_k 和 R_k 均为常数, 分别与 w 和 v 相关, 估计误差协方差 P_k 和增益矩阵 K_k

将会在计算中迅速收敛，并保持不变。

卡尔曼滤波器限定了系统噪声必须符合正态分布，且必须为线性系统，而在实际使用中，很难同时满足要求，此时精度就会较低。

2.2.3 粒子滤波

粒子滤波器（particle filters）是一种基于概率密度的粒子表示的顺序蒙特卡洛方法（sequential Monte Carlo methods），它可以应用在任意状态-空间模型，可以对非线性、非高斯系统的动态进行建模，是传统的卡尔曼滤波的一般化方法^[24]。

首先对跟踪目标进行建模，并定义一种相似度度量确定粒子与目标的匹配程度。在目标搜索的过程中，它会先按照一定的分布（比如均匀分布或高斯分布）在全局撒一些粒子，统计这些粒子与目标的相似度，确定目标可能的位置。

首先在目标周围均匀地或按高斯分布随机散布一些粒子，它们在图中的位置分别为 $\{x_i, i = 0, \dots, N\}$ ，每个粒子都计算其所在区域内的特征向量，与初始的目标区域的特征作比较，得到一个相似度，将这些相似度归一化得粒子的权重 $\{w_i, i = 1, \dots, N\}$ ， $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。则在这张图像上，目标最可能在位置为 $\sum_{i=1}^N w_i x_i$ 。之后，我们根据每个粒子的权重 w_i 进行粒子重采样，在概率较大的位置多撒粒子，减少概率小的位置的粒子个数，将重采样后得到新的粒子集再通过顺序重要性采样算法（Sequential Importance Sampling）得到新的粒子集，用于下一帧的目标识别。

粒子滤波器相对于卡尔曼滤波器，虽然适用范围更广，但计算量也更大。

2.2.4 均值漂移算法

均值漂移算法（MeanShift）是用于定位图中概率密度最大的位置的算法，常常结合 HSV 颜色直方图进行目标跟踪。以利用 HSV 颜色直方图模型为例，给定了一个初始的包括目标行人的搜索窗口，MeanShift 算法首先将图片的 RGB 分量转化为 HSV 分量，统计该搜索窗口内的 H 分量直方图，将直方图归一化后，我们便可以得到所有 H 值 ($\in [0^\circ, 360^\circ]$) 对应的概率。在统计直方图时，为了避免由于低光照导致的错误数据，将 V 值低于某一阈值的像素点不予统计。接着，将全图的所有像素值都用它的 H 分量所对应的概率表示，得到的图像被称为反向投影图，如图2.9所示。MeanShift 所谓的求图中概率密度最大的位置，即是求反向投影图中平均值最大的窗口，在 CamShift 中用一种类似梯度下降法的方法实现，求得局部最大值。对于新的一帧，首先求当前搜索窗口的质心位置，即将

像素概率作为权重，求所有位置的加权平均，接下来将这个质心作为新的搜索窗口的中心，重复计算其质心，如此循环，直到搜索窗口收敛，即为概率密度的局部极大值。

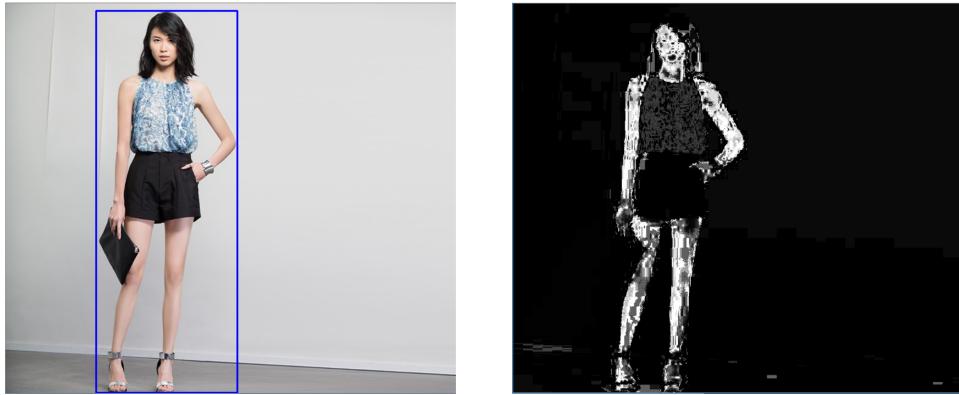


图 2.9 左：原图像，蓝色框内为初始提供的含目标行人的搜索窗口；右：反向投影图

在 MeanShift 算法的基础上，Bradski^[25] 提出了一种对 MeanShift 算法在视频上的扩展，即连续自适应均值漂移算法（Continuously Adaptive MeanShift, CAMShift）。CAMShift 算法对视频的所有帧都进行 MeanShift 运算，并将上一帧得到的目标所在窗口中心和大小作为下一帧的初始搜索窗口。相对于 MeanShift，它在所有帧上都重新按照上一帧所得到的窗口计算反向投影图，此外，在每一帧上，当 MeanShift 算法收敛后 CAMShift 算法都会根据目前搜索窗口中的像素概率值之和更新搜索窗口的大小，这样以来就可以一定程度上解决目标在尺度上的变化、形变和部分遮挡。

2.2.5 相关滤波

在信号处理中，使用相关性来描述两个信号之间的联系。在相关滤波算法中，根据当前帧的信息和之前帧的信息训练出一个相关滤波器，然后与新输入的帧进行相关性计算，得到的置信图表示了输入帧中每个像素或图像块是目标的位置概率，得分最高的点或块就是最可能的跟踪结果。

Henriques et al.^[26] 在 2015 年提出了 KCF 算法 (Kernelized Correlation Filters)，它利用了在傅里叶域中，两个矩阵的卷积可以被转换为逐元素的点乘的性质，在达到与以往的更加复杂的算法的效果的基础上，降低了计算所需要的资源和时间。

KCF 算法中可以使用三种核函数，包括线性、多项式和高斯核函数，使用岭

回归进行拟合以得到一个闭式解，都使用较少的计算量得出了较好的预测结果。它通过使用输入向量生成循环矩阵，一方面通过位移增加了样本的个数，一方面利用了循环矩阵可被离散傅里叶变换（DFT）对角化的特性，将岭回归中的求逆运算、矩阵乘法等转换为了计算量小的矩阵间逐元素计算，从而大大提高运行速度。

由于 KCF 使用傅里叶变换，导致滤波器尺寸和图像块尺寸必须一致，这样就限制了检测的尺度，导致 KCF 算法对尺度变化的适应性不强，当物体在图像中的尺度发生变化时，会导致 KCF 算法不能正常地对物体进行追踪。此外，KCF 使用循环矩阵虽然可以增加分类器的样本数量，但也导致了有些训练数据并不真实。为了解决这些问题，Lukezic et al.^[27] 在 2017 年提出了通道和空间稳定的判别性相关滤波器（Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability, CSRDCF）。根据实验，它有着比 KCF 算法更高的精度，相对的，帧率较 KCF 更低。

CSRDCF 算法通过引入空间置信度和通道置信度来对相关滤波器做出改进。空间置信度图是由反向投影图和先验概率得到每个像素点是目标的后验概率经过二值化后得到的。空间置信图可以用来修正追踪器的尺度，且可以有效地帮助追踪非矩形的区域或目标。

定义对第 i 个像素点的观察 $y_i = [y_i^c, y_i^x]$ ，分别表示该像素的颜色和位置， m_i 为该像素点空间置信度，则 y_i 的概率为：

$$p(y_i) = \sum_{j=0}^1 p(y_i^c | m_i = j) p(y_i^x | m_i = j) p(m_i = j)$$

其中 $p(y_i^c | m_i = j)$ 为由背景和前景的颜色直方图根据贝叶斯规则得到，类似于 Mean-Shift 中的方法，根据像素的颜色名计算反向投影图，得到各像素点属于前景或背景的概率。 $p(m_i = j)$ 为该像素属于前景或背景的先验概率，由前景和背景的区域大小比例决定。估计的目标位置的中心像素即使在旋转、变形等情况下仍然很大可能含有目标，而在没有测量的情况下，远离中心的像素属于目标和背景的概率是相当的。基于这些知识，可以通过 Epanechnikov 核函数估计的弱空间先验概率：

$$p(y_i^x | m_i = j) = k(x; \sigma) = 1 - (x/\sigma)^2$$

其中 σ 是最小界限框的轴长，此外，先验概率被限制在 $[0.5, 0.9]$ 的范围内，即在中心点周围的像素先验概率为 0.9，当像素离中心越远时，先验概率越小，而

远离中心点的像素，先验概率均为 0.5。通过先验概率和颜色置信度计算出空间置信度图再进行二值化后，由于其中的元素由 0 和 1 组成，故通过将它和滤波器进行点乘，就可以排除掉图像中空间置信度为 0 的点。在加上这个空间限制后，无法得到一个滤波器的闭式解，但可以通过迭代的方法最小化损失函数，得出滤波器的值。在追踪的过程中，一旦目标被定位，滤波器也会根据提取出的区域进行更新。

通道置信度反映了每个特征通道对应的滤波器的辨别能力和重要性，在目标定位阶段计算相关响应时将其作为每个滤波器的权重，包括了通道学习置信度和通道检测置信度。

CSR-DCF 算法的每一次迭代都分为定位和尺度估计，以及更新两个阶段。在定位和尺度估计阶段，根据上一帧的图像块特征、滤波器和通道置信度的相关响应最大值得到一个新的目标位置，根据各通道的响应，估计新的通道检测置信度，使用新的位置来估计尺度。在更新阶段，提取前景和背景的颜色直方图，并估计空间置信图，更新滤波器和通道置信度。

CSR-DCF 算法在速度和准确度上都达到了非常好的水平，在单 CPU 上既能达到实时，在准确度上，CSR-DCF 算法在 VOT2017 比赛的实时实验部分取得了最佳结果^[28]。

2.2.6 GOTURN

GOTURN 是一个基于深度神经网络的跟踪算法^[29]，在深度学习的跟踪算法中，GOTURN 由于其达到 100FPS 的高帧率脱颖而出，它对于视角的变化、光照、变形等具有鲁棒性，但不能很好地处理遮挡。

GOTURN 网络以视频当前帧和上一帧作为输入，输出当前帧的目标所在区域的 bounding box 的位置。GOTURN 的网络结果如图2.10所示。其中的卷积层（Conv Layers）用于抽取图像特征，全连接层（Fully-Connected Layers）用于特征比较，找出当前帧上的目标位置。上一帧的剪切（crop）已知，当前帧的剪切是以上一帧的跟踪目标为中心，截取两倍目标大小的区域作为搜索区域，在该区域内进行回归。

2.2.7 TLD

TLD，即 Tracking-Learning-Detection 是一种单目标长时间的目标追踪算法，TLD 算法将长期追踪的任务分解成三个：跟踪、学习和检测。追踪模块在每个帧

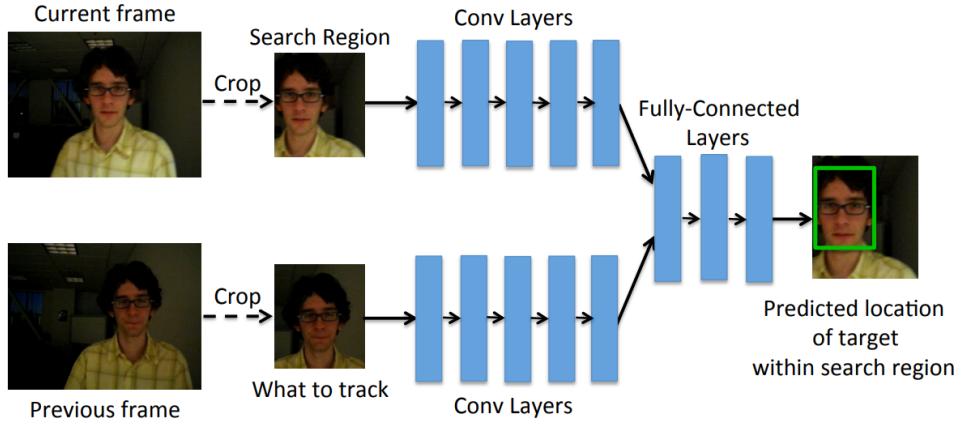


图 2.10 GOTURN 神经网络结构

上不停地追踪对象的位置；探测模块在适当时候对追踪其进行校正；TLD 中还提出了 P-N 学习模块来识别检测器的错误并更新检测器，^[30]。

TLD 中使用 Median-Flow 作为追踪器，使用窗口扫描法和级联分类器作为检测器。级联分类器分为三个阶段：图像块方差（patch variance）、集合分类器（ensemble classifier）和最近邻（nearest neighbor）。

图像方差分类器计算目标物所在图像块的灰度值方差，并丢弃所有灰度值方差少于其 50% 的待测图像块。50% 这一阈值可以根据具体应用调整，它限制了目标的最大外观变化。通过图像方差分类器的图像块再经过集合分类器，它由 n 个基本分类器组成，每个集合分类器 i 对图像块进行像素比较，并得到一个二进制码 x ，由 x 得到一个后验概率 $P_i(y|x)$ ，其中 $y \in \{0, 1\}$ 。将每个基本分类器的后验概率进行平均，并将 $y = 1$ 的后验概率小于 50% 的图像块舍去。最后一级分类器是最近邻分类。

对一帧的探测和追踪都完成后，TLD 取追踪器得到的目标所在边界框（bounding box）和探测器得到的边界框中置信最大的结果作为最终估计，当二者都没有得到边界框，则认为目标在这一帧中不可见。由于 TLD 不是一直采用追踪器的结果，所以边界框在帧之间可能会发生跳动。

学习模块是 TLD 算法的新颖之处，它在第一帧进行初始化，并在运行时更新探测器以改善其性能。学习模块分为四个部分：待训练的分类器、训练数据集、监督学习、P-N 专家，如图2.11所示。P-N 专家（P-N experts）用于在运行时生成训练所需的正样本和负样本并识别检测器的错误，P 专家识别检测器的漏报（false negatives），并将其添加到具有正标签的训练集中，N 专家识别被检测器预测为正的负样本（false positives），并将其添加到负标签的训练集中。此外，P 专

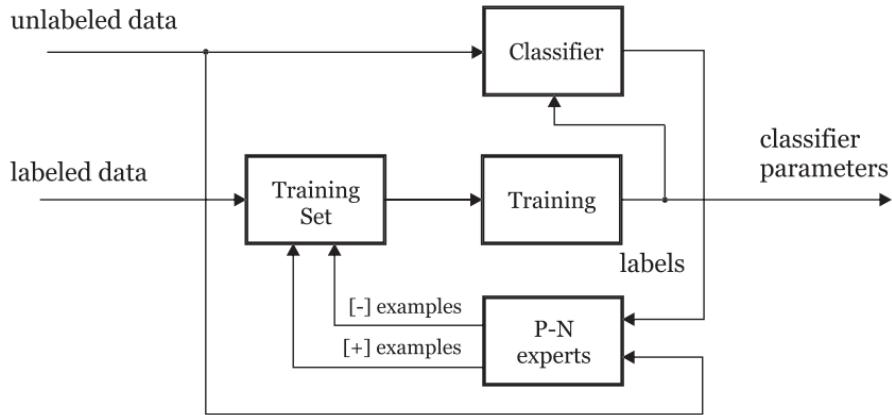


图 2.11 TLD 学习模块结构

家还用于增加正样本的数量，当获得一个含有目标的界限框后，P 专家将其通过几何变换生成若干个仿射的界限框，如将其进行 $\pm 1\%$ 的偏移， $\pm 1\%$ 的尺度变换， $\pm 10^\circ$ 的平面内旋转等操作，这样可以通过增加正样本的数量来提高分类器的鲁棒性。N 专家则通过在图像的界限框之外的区域取若干个图像块作为负样本。

为了判断检测器的错误，P 专家利用视频的时间连续性，记录目标的轨迹并假设目标延轨迹移动，由此预测当前帧中的目标物位置。如果检测器将当前位置标记为负，则认为是漏报，由 P 专家将其标记为正；N 专家利用视频中的空间结构，并假设目标物在一帧中只能出现在一个位置，它分析当前帧中检测器和跟踪器产生的所有结果，选择置信度最高的结果，并将与所选界限框不重叠的图像块标记为负。需要注意的是，P-N 专家所判断的错误并不总是正确的，它们的假设都有失效的情况，但尽管误差存在，P-N 学习模块仍能够改善检测器的性能，即这种误差在一定条件下是允许的。

第3章 ROS 上的机器人导航算法

3.1 ROS 导航

ROS (Robot Operating System) 是一个开源的专用于机器人软件开发的操作系统。ROS 中提供了一个模块化的简单 2D 导航系统 ROS Navigation，其主要架构如图3.1所示。在已有的导航结构的基础上，我们可以以插件的形式添加所需的行人识别和追踪模块，并根据此信息和用户的要求进行行人跟随。

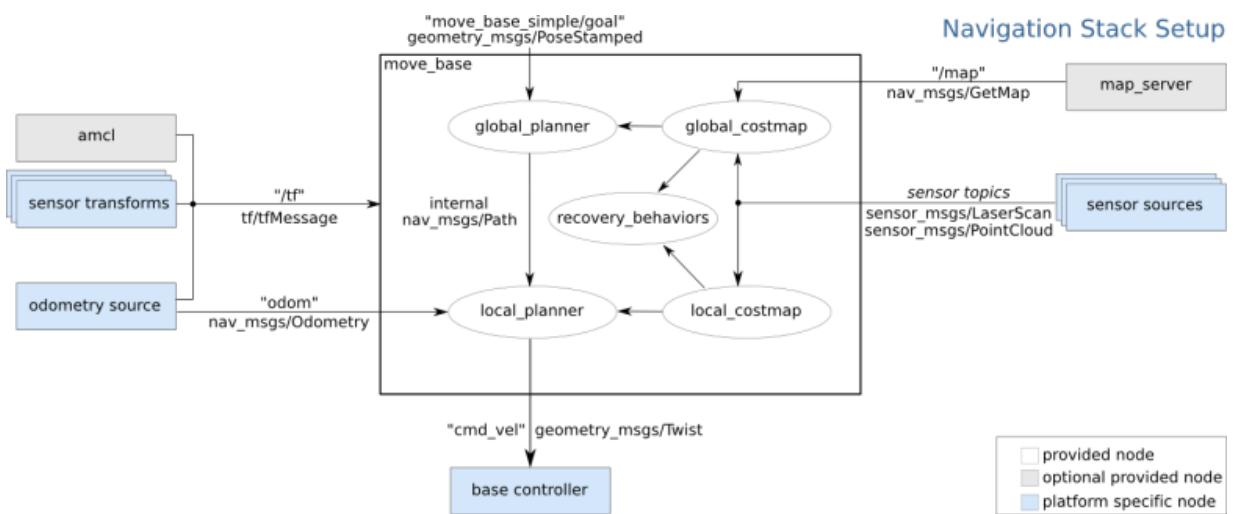


图 3.1 ROS 导航架构

3.1.1 坐标系转换

在机器人系统中存在数个坐标系，包括机器人底座为中心的坐标系，2D 激光传感器为中心的坐标系，摄像机为中心的坐标系，全局地图上的坐标系等。为了能使各个传感器得到的不同坐标系下的信息方便准确地结合使用，ROS 导航提供了 tf 系统，由用户指定不同坐标系之间的 tf 变换，并存储起来，维护一个 tf 变换树。在调用 tf 变换时，只需要指定原坐标系的结点和需要变换的目标坐标系的节点，tf 系统就会自动计算出两个坐标系之间的相对位置和角度，并完成坐标的转换。

3.1.2 里程计

机器人的里程计包括机器人的位姿（pose）和速度（twist），其中，机器人的位姿和其姿势，可以由机器人的初始位置和机器人的控制单元的速度，通过运

动模型计算得到的，也可以通过激光扫描数据对机器人位置的定位得到。里程计信息并被发布给局部规划器，用于路径规划。

3.1.3 建图

对于有里程计和固定水平激光测距仪的机器人，在地面平坦的情况下，可以使用 gmapping^[31] 的方式进行建图。此外还可以选择 cartographer^[32] 方法，在没有里程计，激光测距仪不是完全水平的情况下，如使用者手持激光测距仪的情况下也可以进行建图。建图是实时的，即把当前激光扫描到的物体根据当前的定位加入地图中，所以在室内环境下时，在使用前首先操作机器人将室内环境扫描一遍，即可建立室内的地图。地图使用一个描述地图元数据的 YAML 文件和一个编码了图中占用/自由点的 image 文件存储起来，ROS 导航中提供一个 map_server 节点用于发布地图数据。

由于地图是静态存储的，而环境通常是动态的，为了应对机器人实际运行中可能遇到的意想不到的动态障碍，还需要维护代价地图（costmap）。代价地图采用传感器数据和来自静态地图的信息，以一定的频率进行更新，来存储和掌握实际环境中的障碍物信息。在 ROS 导航中，维护两个代价地图，分别用于在整个环境上的全局和长期规划，以及局部区域内的规划和避障。

3.1.4 定位

自适应蒙特卡罗定位（adaptive Monte Carlo localization, amcl）模块是机器人的定位模块，在建立地图后使用，使用粒子滤波算法进行对机器人当前位置的估计。通过在图上均匀地撒上一些点，再随着机器人在图中的运动，计算每个点的机器人当前位置的概率，减少概率小的位置点的密度，增加概率大的位置点的密度，在粒子不断收敛后即可较为准确地得到机器人在图中的位置。

3.1.5 导航控制

导航控制模块即图3.1中的 move_base 模块，包括全局规划器、局部规划器和恢复机制。全局导航支持 A* 算法和 dijkstra 算法来在全局代价地图上找到前往下一个目的地的最短路径，在机器人开始移动之前就首先被计算出来。局部规划器监控了传感器信息，结合了里程计信息、全局和局部代价地图来选择机器人在全局路径的局部分块中应选择的最佳速度（线速度和角速度），传送给 base_control 模块。同时，局部规划器也可以动态地重新规划机器人的局部路径

以进行避障，使用动态窗口法（Dynamic Window）^[33] 进行局部避障，使用路径展开法（Trajectory Rollout）^[34] 进行局部规划和控制。恢复机制用于出现了异常情况，机器人无法进行决策时使用，ROS 导航提供了两种恢复行为，使用静态地图在用户指定的更大范围外恢复代价地图，或通过使机器人 360° 旋转来尝试清出空间。

3.2 可佳导航

Kejia Navigation

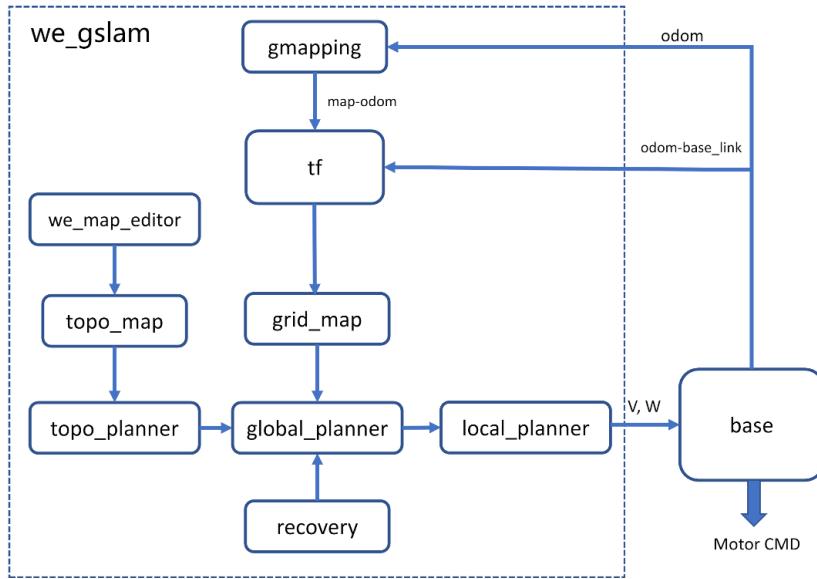


图 3.2 可佳导航架构

可佳导航的架构如图3.2所示，它同样使用 ROS 系统用于软件的运行和各模块之间的通信。在导航方面，它相对于 ROS 导航，还加入了拓扑导航和语义地图。通过手动注释如房间、门、家具等对象的大致位置和区域，自动生成一个拓扑地图，该拓扑地图会用于全局路径规划和定位。

可佳导航使用 A* 算法进行全局和局部的路径规划，并使用向量场直方图（vector field histogram, VFH）^[35] 进行局部避障。可佳导航使用了一个状态机来进行任务的规划和决策。在收到任务目标后，它首先在全局地图上运行 A* 算法，并将全局路径分成一些局部目的地（waypoints），将最近的 waypoint 作为 VFH 算法的目标点，运行局部的避障。如果遇到了障碍物，将障碍物更新到本地代价地图中，重新运行 A* 的局部路径规划，如果此处的局部路径规划失败，则运行恢复机制^[36]。

第4章 以可佳机器人为基础的行人追踪与系统

4.1 视觉行人追踪系统

4.1.1 总体架构

1. 目标人物注册

追踪系统在初始化时需要得到目标行人所在的大致位置，即提供行人在初始帧中的界限框（bounding box），并由此对追踪器和分类器进行初始化。为了能够有效地对目标用户进行识别，这里采用开源系统 OpenPose^[37] 来进行人体的骨骼识别。OpenPose 系统不仅可以判断出图像中所有人物的骨骼信息，还可以对人物的姿势进行识别，这带来了另一个好处，即我们可以要求被跟随的目标站在机器人前方做出一个指定的姿势，如举起右手，直到机器人提示注册成功，这样一来，我们就可以在对目标人物的特征没有先验知识的情况下在初始化时发现目标了。

2. 行人追踪器

根据 VOT2017 的结果^[28]，CSR-DCT 算法在实时实验中取得了最佳的结果，由于其出色的性能和实时性的良好实现，选用 CSR-DCT 作为追踪器。CSR-DCT 追踪器是一种相关滤波追踪器，它将 HOG 和颜色特征相结合，并提出了空间和通道置信度来对追踪器进行调整。在实际测试中，CSR-DCT 算法可以达到约 40FPS 的帧率，达到实时性要求。相对于其他速度更快的算法，如 MedianFlow、MOSSE、CamShift 算法，CSR-DCT 算法更为准确，在一定程度上对于遮挡鲁棒。帧率相对较高的 KCF 追踪器在尺度不变的情况下也能做到相似的准确程度，能在一定程度上解决目标被遮挡的问题，且有可能在失败后再次恢复，但前面已经讨论过，KCF 算法无法适应目标尺度大小的变化。另一个适应于长期追踪的 TLD 算法，识别准确率较低，边界框会经常跳动或漂移，甚至会经常检测到错误的位置，但在目标在视野中消失一段时间后再回到画面时，TLD 算法能识别到目标的回归并继续对其追踪。

在实际使用时，CSR-DCT 算法最大的缺点即为它几乎无法从跟踪失败中恢复，且对于错误的情况，CSR-DCT 算法常常不能及时发现。既然选用了 CSR-DCT 算法，并想使用它来完成一个长期追踪的任务，这就成为了必须克服的问题。为此，在系统中加入一个分类器，该分类器在追踪时检测追踪器是否发生错误，并

在追踪器追踪失败时尝试找回目标、帮助重新建立追踪。

3. 分类器

(1) 分类器的选择

分类器通常要结合人工特征来使用，在行人识别中，最为常用的特征即为 HOG 特征。HOG 特征和 SVM 分类器的组合从 Dalal et al.^[19] 最先提出开始，就在行人检测领域取得了重大的成果和最好的效果。但由于 HOG 检测的是人体的轮廓特征，对于形变和快速运动效果不好，当图像分辨率较低时效果也会变差。此外，HOG 对于不同行人之间进行分辨效果也不佳。由于 HOG 特征的这些缺点，同时引入颜色直方图来对图像信息做补充。颜色直方图对光照变化和背景颜色相似的情况较为敏感，对目标的细节信息和颜色的相对位置不关注，但这些问题可以由 HOG 来代为弥补，而颜色直方图没有边界效应，对快速运动不敏感，且由于不同行人的衣着不同，对于不同行人的分辨也起到很大作用。所以在本文中使用 HOG 特征和 HSV 直方图中的 H、S 直方图结合起来描述目标的特征。

为了分类精度，使用高斯核的 SVM 分类器进行分类。为了减少运行时计算量，且避免错误的追踪结果污染分类器的情况，这里仅仅对分类器进行一次初始化而不是采用在线学习的机制。

(2) 分类器的初始化

在训练分类器时，需要正负样本，负样本从图像背景中提取，正样本即为目前目标所在图像区域。为了增加样本的数量，提高分类器准确度，采用以下两个方法：

- a. 在建立起追踪后，提取一定数量的帧后再进行训练。如设定提取前 100 帧的图像，这个过程约为 5 秒时间，在这段时间内，假设追踪器不会出现错误且目标不会被遮挡；但如果在这段时间内，由于物体离开视野或严重变形等原因导致追踪器发生失败，则立即将收集到的正负样本传给分类器进行学习。
- b. 参考类似 MIL 追踪器的思想，通过将初始帧进行一定的旋转、位移、尺度变化等操作增加正样本数量。如随机将物体所在界限框平移不超过 10% 的距离，旋转不超过 5° 的角度，进行 5% 以内的缩小或放大，取新的界限框在图像中的区域，或对原图像进行镜面翻转、高斯模糊等操作，将这些得到的新图像块加入正样本，便可以大大提高正样本的数目。取负样本时，通过在界限框之外随机取背景图像即可达到需要的数目。

(3) 检测和恢复追踪器的错误

由于运行分类器的速度要明显慢于运行追踪器的速度，并不会对每一帧追踪器的结果进行验证，而是每 10 帧左右将当前追踪器得到的图像块输入到分类器中得到一个分数，即它属于正样本的概率。设置一个阈值 $fail_thred$ ，当得分小于该阈值时，认为当前图像块非目标区域。但是在追踪任务中，经常会出现目标发生形变和被遮挡的情况，追踪器可以对这些情况在一定程度上鲁棒，但分类器就会对其此时的结果直接否定。针对这种情况，设置一个能容忍分类器报错的最大次数，当分类器连续报错超过此阈值时，认为追踪器出错，误追踪了其他对象，否则认为是目标短暂地发生了形变或受到了遮挡，不对追踪器进行更新。

当判断追踪器发生错误或追踪器自身发生失败时，使用分类器对当前帧进行不同尺度上的全局扫描，进行目标行人的搜索。在这个过程中，记录全局扫描中得到的得分最高的图像块，若其得分超过一个阈值 $positive_thred$ ，则认为该图像块包含目标，否则确认目标丢失。

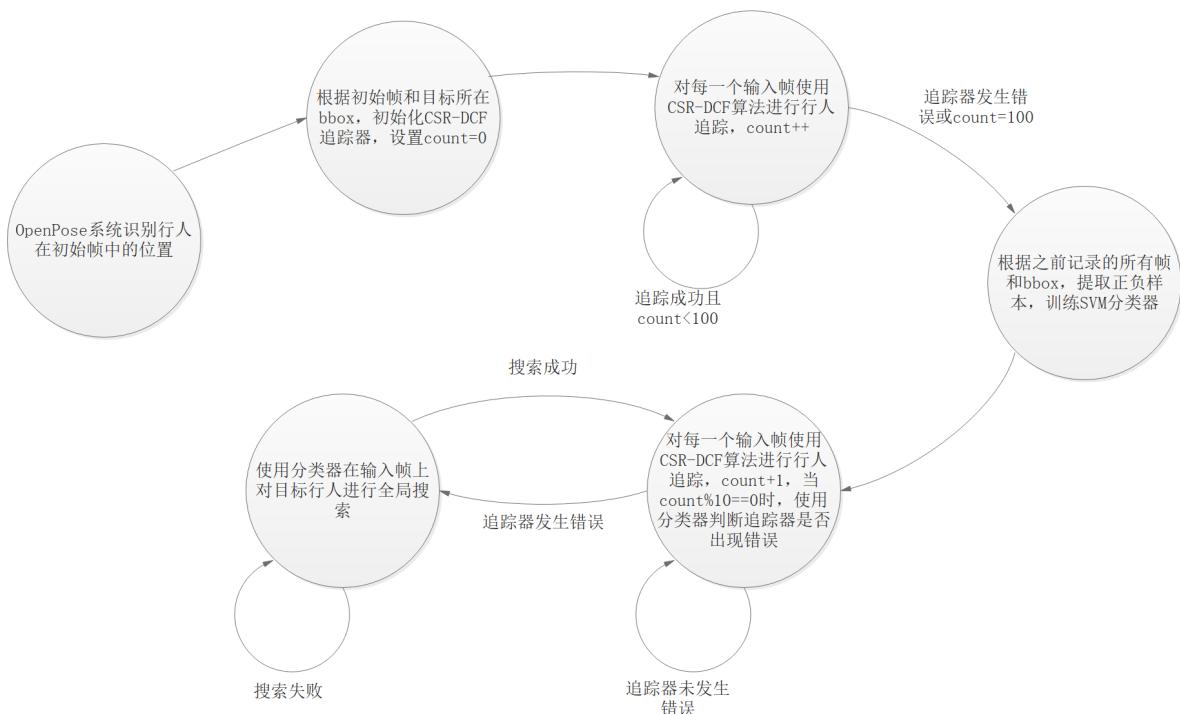


图 4.1 有限状态机

4. 目标丢失恢复

当追踪失败且分类器也未能发现物体时，认为目标丢失，此时有几种可能：(1) 目标从视野的左右两侧消失；(2) 目标被完全部分或完全遮挡，如进入了另外的房间；(3) 目标发生严重形变，或因光照的变化导致分类器检测失败。

对于情况(1)和(2),相对于静态相机进行追踪时只能等待行人回到视野,机器人上的行人追踪系统可以使机器人主动转动视角或前往行人上一个出现的位置,来及时地恢复对行人的追踪。

由于CSR-DCE追踪器几乎不能处理目标丢失后的恢复工作,使用分类器以一定频率对于输入帧进行全局扫描,当重新检测到目标时,重新初始化追踪器,建立追踪。

5. 总体结构

把初始化过程、追踪器、分类器三个模块整合起来,由一个有限状态机判断目标应采取的算法,如图4.1所示。

4.1.2 系统测试实验结果

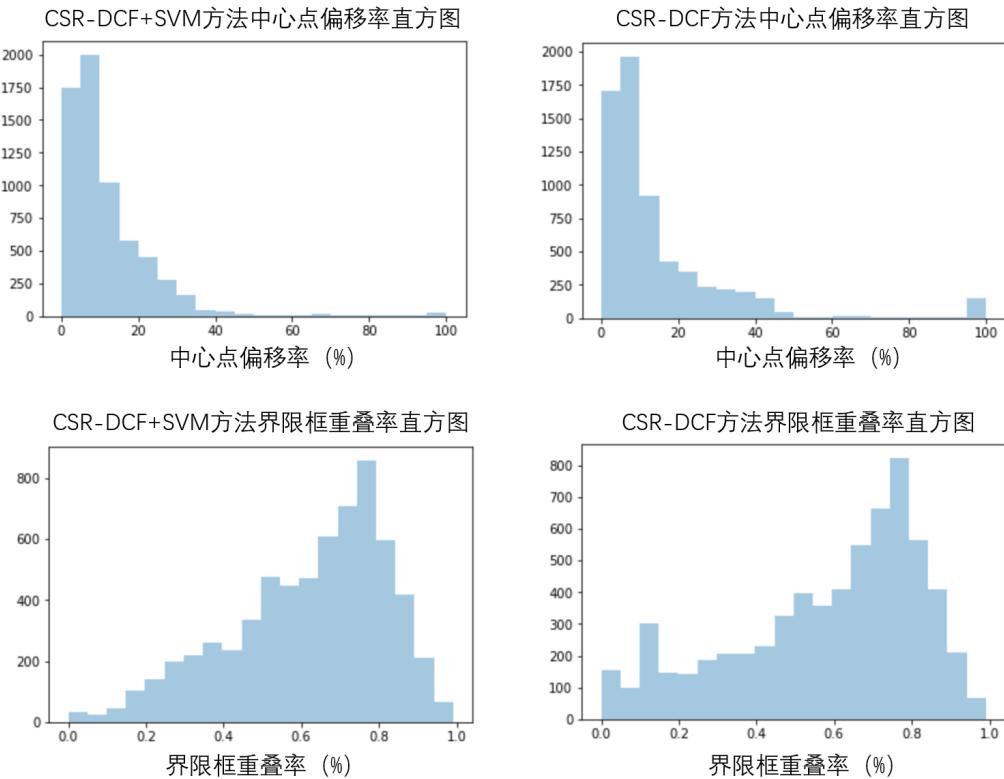


图 4.2 CSR-DCF+SVM 系统和 CSR-DCF 系统结果的中心点偏移率和界限框重叠率统计图

使用目标检测和追踪数据集 TB-100^[14] 中的 14 个行人追踪视频序列进行测试,这 14 个视频囊括了包括光照变化、遮挡、目标变形、平面内旋转、平面外旋转、背景相似目标干扰、低分辨率、尺度变化、运动模糊、快速移动、低分辨率这些视频追踪中的常见难点。在测试中,分别统计追踪器得到的界限框与实际的重叠率,即两个界限框重叠区域的大小占它们总面积的比例,以及界限框中心

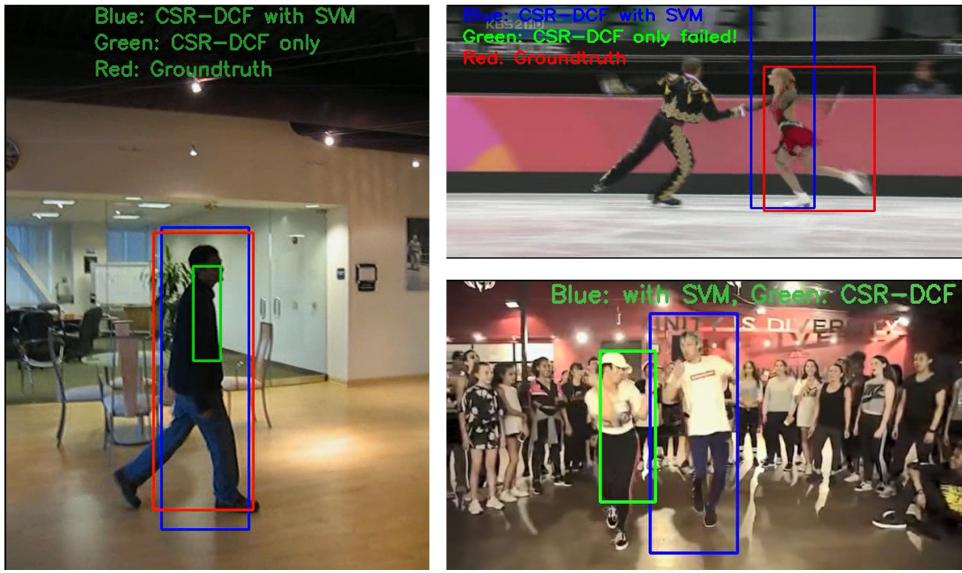


图 4.3 左：由于目标尺度变化导致 CSR-DCF 追踪器处于错误的尺度上；右上：由于目标运动速度过快导致 CSR-DCF 算法直接失败；右下：由于目标被另一个人物暂时遮挡导致 CSR-DCF 算法追踪了错误的行人。

点相对于实际界限框的偏移比例。由于在检测到目标区域后，接下来还会使用该区域的中心点作为目标的坐标控制机器人向其移动，所以使用中心点偏移衡量追踪和识别的精确程度，但由于中心点偏移率无法衡量追踪的尺度是否准确，所以另外引入重叠率。对于 14 个视频总共 6448 帧的图像，统计在每一帧上重叠率的平均值和重叠率超过 50% 的帧数，以及中心点偏移率的平均值，偏移率超过 50% 和 20% 的帧数。为了验证加入分类器是否提高了系统准确度，还采用了只使用 CSR-DCF 追踪器的结果作为比较。

在 6448 帧中，CSR-DCF+SVM 系统出现了 10 帧的追踪失败，平均重叠率为 62.16%，有 1625 帧重叠率小于 50%；由于没有分类器帮助恢复，CSR-DCF 系统的追踪失败则为 141 帧，平均重叠率为 58.26%，有 2027 帧的重叠率低于 50%。在中心点偏差方面，CSR-DCF+SVM 系统的平均中心点偏差率为 15.81%，有 108 帧偏差率大于 50%，有 82.74% 的帧中心点偏差率小于 20%；而 CSR-DCF 系统则有 232 帧的中心点偏差量超过 50%，77.73% 的帧中心点偏差率小于 20%，中心点偏差量平均值为 27.32%。具体的分布如图4.2所示。

实际上，在大部分情况下，由于 CSR-DCF 算法自身良好的性能，SVM 对其的帮助有限，但在复杂情况下追踪失败，或者有遮挡情况下追踪器错误追踪了其他物体，由于尺度变化导致界限框处于错误的尺度等情况时，SVM 便能对其进行有效地校正措施。如图4.3所示。

在追踪速度方面，在测试的 14 个视频上，单独使用 CSR-DCF 可以达到 40.78FPS 的平均帧率，而加入 SVM 后，平均帧率降为 16.36FPS，勉强能够进行实时的使用。CSR-DCF+SVM 系统的帧率受到视频质量的影响较大。当人物未收到遮挡或发生形变较小时，仅使用 SVM 来进行验证几乎不会影响视频帧率；而当 SVM 验证错误，或者追踪失败，而导致需要进行全局的扫描检测时，便会大大拖慢整体帧率。

4.2 行人定位与机器人导航

通过视觉追踪系统获得行人在 RGB 图像中的位置，并不是对行人定位模块的终点。可佳机器人配备了 Kinect 深度相机，它可以同时为机器人提供 RGB 图像和深度图像的输入，经过对齐后，便可以简单地通过目标在 RGB 图像上的位置得到目标相对于机器人的角度和距离，从而得出目标的 3D 坐标。

但 Kinect 的深度图像也有一定的不足。使用 RGB-D 相机 Kinect 作为彩色图像和深度信息的输入，而 Kinect 的深度图像只能有效判断 80 厘米之外的物体的距离，且由于 Kinect 通过红外发射器和红外摄像头来获得深度信息，所以受阳光照射的影响较大，所以在实际使用中，Kinect 深度图像可能会出现不稳定和空洞现象。对于 Kinect 的深度图像在近距离精度较低的现象，可以考虑在较近距离内使用 2D 激光进行行人的 3D 位置判别。对于 Kinect 的空洞现象，由于视觉追踪系统最终得到的一个区域块，所以只需要从该区域块在深度图像中的对应区域中选择合适的深度信息即可，部分区域的噪音和空洞现象不会影响到最终的结果。

在第三章中已经对 ROS 导航和可佳导航进行了调研，二者都有较为稳定鲁棒的导航功能。在得到目标的坐标后，可以选择调用 ROS 导航或可佳导航模块，将目的地实时地设置在行人目前所在位置，同时为了不妨碍行人的动作，还需要注意与行人保持一定的距离，在达到这个距离后停止机器人的移动。这样便可以实现一个较为稳定、交互友好的机器人行人跟随系统。

第 5 章 总结

通过对于已有机器人行人跟随解决方案的调研，本文确定了从视觉行人追踪算法为基础的机器人行人跟随方法。在视觉行人追踪领域，调研了常用的包括卡尔曼滤波、粒子滤波、均值漂移、相关滤波等视觉目标追踪算法，经过实验后，最终选定了相关滤波中的 CSR-DCF 算法作为本文系统中追踪器的实现算法。CSR-DCF 算法对于遮挡、形变、光照都在一定程度上鲁棒，且可以适应目标的尺度变化，是目前视觉追踪中准确度和速度都较为优秀的算法之一。但由于 CSR-DCF 算法存在对目标失去追踪后难以恢复的问题，且在复杂情况下可能会出现错误的追踪，本文还调研了一系列单帧上的行人检测算法，在深度学习算法和人工特征-分类器算法之间权衡后，选择使用 HOG 结合 HSV 直方图作为特征，SVM 作为分类器进行行人检测，以防止追踪器发生误判或漏判现象，以及帮助追踪器从追踪失败中进行恢复。

本文最终实现的视觉行人追踪系统比起仅使用 CSR-DCF 算法追踪的系统，可以在一定程度上处理追踪器错误追踪其他行人或物体的情况，并且当追踪器失去对目标的追踪后，只要目标回到画面中，便可以很快地恢复追踪。同时，运行速度在大部分时候可以达到实时水平。

此外，本文还调研了 ROS 中的导航系统，包括 ROS 提供的开源导航包和由中国科大研发的可佳导航系统。在使用视觉行人追踪系统得到行人在 RGB 图像中的位置后，通过对齐 Kinect 深度图像得到行人在机器人坐标系中的三维位置，设置为目标后再调用导航系统中的导航功能便可以实现稳定的行人跟随系统。

参 考 文 献

- [1] Treptow A, Cielniak G, Duckett T. Real-time people tracking for mobile robots using thermal vision. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(9):729-739.
- [2] Zhou H, Taj M, Cavallaro A. Target detection and tracking with heterogeneous sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(4):503-513.
- [3] Susperregi L, Martínez-Otzeta J M, Ansuategui A, et al. Rgb-d, laser and thermal sensor fusion for people following in a mobile robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(6):271.
- [4] Arras K O, Grzonka S, Luber M, et al. Efficient people tracking in laser range data using a multi-hypothesis leg-tracker with adaptive occlusion probabilities. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008:1710-1715.
- [5] Kleinehagenbrock M, Lang S, Fritsch J, et al. Person tracking with a mobile robot based on multi-modal anchoring. *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2002:423-429.
- [6] Bellotto N, Hu H. Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2008, 39(1):167-181.
- [7] Wong C, Kortenkamp D, Speich M. A mobile robot that recognizes people// Proceedings of 7th IEEE international conference on tools with artificial intelligence. IEEE, 1995: 346-353.
- [8] Cruz C, Sucar L E, Morales E F. Real-time face recognition for human-robot interaction//2008 8th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition. IEEE, 2008: 1-6.
- [9] Bellotto N, Hu H. Multimodal people tracking and identification for service robots. *International Journal of Information Acquisition*, 2008, 5(03):209-221.
- [10] Noceti N, Destrero A, Lovato A, et al. Combined motion and appearance models for robust object tracking in real-time. *2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2009:412-417.
- [11] Alvarez-Santos V, Pardo X M, Iglesias R, et al. Feature analysis for human recog-

- nition and discrimination: Application to a person-following behaviour in a mobile robot. *Robotics and autonomous systems*, 2012, 60(8):1021-1036.
- [12] Mowbray S D, Nixon M S. Automatic gait recognition via fourier descriptors of deformable objects//International Conference on Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication. Springer, 2003: 566-573.
- [13] Koide K, Miura J. Identification of a specific person using color, height, and gait features for a person following robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 84:76-87.
- [14] Wu Y, Lim J, Yang M H. Object tracking benchmark. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37:1834-1848.
- [15] Sural S, Qian G, Pramanik S. Segmentation and histogram generation using the hsv color space for image retrieval. *Proceedings. International Conference on Image Processing*, 2002, 2:II-II.
- [16] Foley J D, Van Dam A, et al. Fundamentals of interactive computer graphics: volume 2. Addison-Wesley Reading, MA, 1982.
- [17] Ojala T, Pietikainen M, Harwood D. Performance evaluation of texture measures with classification based on kullback discrimination of distributions. *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition*, 1994, 1:582-585.
- [18] Ojala T, Pietikäinen M, Mäenpää T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2002(7):971-987.
- [19] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. *international Conference on computer vision & Pattern Recognition (CVPR '05)*, 2005, 1:886-893.
- [20] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [21] Zhou H, Yuan Y, Shi C. Object tracking using sift features and mean shift. *Computer vision and image understanding*, 2009, 113(3):345-352.
- [22] Babenko B, Yang M H, Belongie S. Visual tracking with online multiple instance learning. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009:983-990.
- [23] Welch G, Bishop G, et al. An introduction to the kalman filter. 1995.

-
- [24] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on signal processing*, 2002, 50(2):174-188.
 - [25] Bradski G R. Computer vision face tracking for use in a perceptual user interface. 1998.
 - [26] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2015, 37(3):583-596.
 - [27] Lukezic A, Vojir T, Ćehovin Zajc L, et al. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017:6309-6318.
 - [28] Kristan M, Leonardis A, Matas J, et al. The visual object tracking vot2017 challenge results. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017:1949-1972.
 - [29] Held D, Thrun S, Savarese S. Learning to track at 100 fps with deep regression networks. *European Conference Computer Vision (ECCV)*, 2016.
 - [30] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-learning-detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2012, 34(7):1409-1422.
 - [31] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W, et al. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. *IEEE transactions on Robotics*, 2007, 23(1):34.
 - [32] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2d lidar slam. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016:1271-1278.
 - [33] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 1997, 4(1):23-33.
 - [34] Gerkey B P, Konolige K. Planning and control in unstructured terrain. *ICRA Workshop on Path Planning on Costmaps*, 2008.
 - [35] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*, 1991, 7(3):278-288.
 - [36] Liu J, Zhang Z, Tang B, et al. Wrighteagle@ home 2017 team description paper.

RoboCup@ Home, 2017.

- [37] Cao Z, Hidalgo G, Simon T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using Part Affinity Fields. *arXiv preprint arXiv:1812.08008*, 2018.

致 谢

感谢在整个论文写作过程中给予我指导和帮助的陈小平教授和陈广大同学。陈教授作为我的本科毕业论文指导老师，及时监督我的工作进度，并在论文完成的过程中给了我悉心的教导。陈教授深厚的学术功底、严谨的工作态度和敏锐的科学洞察力着实使我受益良多。实验室的博士研究生陈广大学长也在论文的开题工作、初期调研和实验方面给我了很多帮助。

最后，感谢在本科期间为我授课的所有老师，培养了我对于计算机科学的兴趣，夯实了我在计算机科学领域的理论和实验基础，可以在本科结束的时候独立完成一个从调研到实现的完整项目，我在本科期间所学到的基础知识和授予我这些知识的老师们功不可没。