

机动目标跟踪技术发展

张兆翔

(北京航空航天大学, 北京, 100191)

摘要: 目标跟踪技术不但应用于智能视频监控等场景, 也在国防和军事领域有着重大的研究和应用价值。机动目标跟踪技术是目标跟踪技术中目前正在蓬勃发展的一个分支, 在军事领域发挥着重大作用, 目前大多数算法都依据卡尔曼滤波或者扩展卡尔曼滤波的经典跟踪方法。本文先总结了目标跟踪技术的研究现状和发展前景, 以此为前提讨论机动目标跟踪技术, 着重对机动目标卡尔曼滤波跟踪进行概要阐述。

关键词: 目标检测; 机动目标跟踪; 多目标跟踪; 卡尔曼滤波

0 引言

随着计算机技术尤其是计算机视觉等领域的不断进步, 人们可以利用计算机自动的对场景中感兴趣目标进行检测、跟踪和识别, 并在此基础上对感兴趣目标进行分析理解。目标跟踪技术即是通过一个或多个传感器, 利用计算机来完成信号处理, 从而感知它所监控的环境。计算机利用传感器得到的观测值中蕴涵的信息估计出每个目标的状态特征(比如位置、速度等)就是目标跟踪滤波技术。机动目标跟踪技术是目标跟踪滤波技术中目前正在蓬勃发展的一支。

近年来, 计算机视觉方面的顶级国际会议涌现出大量关于目标跟踪的文章。可见, 目标跟踪是目前国际计算机视觉方面的专家学者重点关注的研究方向之一。目标跟踪具有深刻的理论价值, 具体体现在: 1) 目标跟踪是计算机进行场景分析和理解(如行为分析和识别)的基础和前提。2) 目标跟踪牵涉到众多的应用领域可以广泛应用于机器人、机器视觉、人机交互和三维重建等领域, 对于促进多学科发展和交叉具有重要意义。3) 目标检测仍然有亟待解决的问题, 例如对光照、遮挡和视角变化等的鲁棒性^[1,2]。

目标跟踪可以广泛的用于军事应用。在军事应用中需要识别和跟踪大量的目标, 而其中的目标信息既包括机动目标和非机动目标, 也包括环境混响和虚警等干扰。在精确武器发射、卫星侦察、防御系统等复杂应用环境中有多任务、多目标并发的特点, 需要跟踪系统及时、快速的响应, 这就需要高速度、高机动性和高性能的技术, 研究目标跟踪尤其是机动目标跟踪技术对于军事和国防领域有着巨大的推动作用。

1 目标跟踪技术

目标跟踪的基本概念是在 1955 年首次提出的。Sittler 在 1964 年开创性的研究了多目标跟踪理论及相关的的多数据关联问题。从 70 年代开始, 机动目标跟踪理论开始得到广泛的关注。1975 年, Bar-shalom 将数据关联和 Kalman 滤波结合起来应用于目标跟踪, 这标志着多目标跟踪系统的新的的发展。目前越来越多的国内外学者专注于复杂环境的目标跟踪, 使之能够更好的适应实际应用环境。

1.1 目标跟踪

目标跟踪涉及四个基本问题: 1) 目标检测; 2) 表观模型; 3) 跟踪策略; 4) 多目标跟踪。下面简要介绍这四个方面的研究现状。

在计算机视觉中, 目标检测主要方法有两种: 1) 背景相减法(Background Substraction)方法; 2) 基于分类器和滑动窗口(Sliding Window)的方法。背景相减法利用视频图像在时间上的统计特性学习出背景, 然后将当前图像与背景图像做差分, 通过阈值判别的方法来分割出运动目标, 典型例子是混合高斯模型(GMM, Gaussian Mixture Model)^[3]。基于分类器和滑动窗口的方法利用一个已训练好的分类器在图像平面的各个尺度上作滑动窗口扫描, 给出每个窗口的类别标记(比如, 1: 正样本, 0: 负样本), 然后通过一些后处理方法合并属于同一目标的正样本窗口, 得到最终的目标检测结果。

大多数跟踪算法需要建立目标的表观模型(Appearance model)。表观模型非常重要, 在跟踪策略确定的情况下, 表观模型决定了跟踪性能, 包括鲁棒性、精确性和跟踪速度。现有的表观模型例如图像处理中的

颜色直方图、基于核密度估计表观模型、混合高斯表观模型等。但是复杂的表观模型运算速度受到一定限制，简单的表观模型有无法精确地表达模型。

从优化的角度看，目标跟踪大概有两种策略：一种是确定性（Deterministic）跟踪策略，一种是随机性（Stochastic）跟踪策略。确定性策略往往通过对一个代价函数（CostFunction）作梯度下降搜索或者通过在线学习的方式直接从底层数据中估计出目标的位置。这种策略涉及到一系列方法，典型的方法有基于模板匹配的方法^[4]、核跟踪^[5]和在线 Boosting 的方法^[6]等。与确定性跟踪策略不同，随机性跟踪策略将观测的不确定性和目标运动模型的不确定性引入跟踪过程，将跟踪看成一个状态空间中的贝叶斯推断问题。给定 0 到 t 时刻的观测集 $\vartheta_t = \{O_1, O_2, \dots, O_t\}$ ，设 t 时刻的状态变量为 X_t ，那么贝叶斯跟踪策略可以通过如下公式描述：

$$\rho(X_t|\vartheta_t) \propto \rho(O_t|X_t) \int \rho(X_t|X_{t-1})\rho(X_{t-1}|\vartheta_{t-1})dX_{t-1}$$

跟踪过程完全由动态模型 $\rho(X_t|X_{t-1})$ 和观测模 $\rho(O_t|X_t)$ 型支配。根据动态模型和观测模型的不同，适用的跟踪滤波器也不同。当两者都服从高斯分布，为线性关系时，可以利用卡尔曼滤波(Kalman filter)^[7]解析表达后验概率并求解。当两者为非线性关系时，可以利用扩展卡尔曼滤波(Extended kalman filter,EKF)求解后验概率，此时后验概率仍然满足高斯分布。如果状态空间是离散的，而且是由有限个状态组成的，则可以使用隐马尔科夫模型进行跟踪。卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波是机动目标跟踪中常用的技术，目前国内大多数机动目标跟踪技术都是基于卡尔曼或者扩展卡尔曼滤波进行研究，也有部分研究基于粒子滤波技术。

多目标跟踪跟单目标跟踪不同，需要处理的问题更多。多目标跟踪存在的挑战包括但不局限于：目标的自动初始化，目标间的遮挡推理以及联合状态优化所带来的巨大的计算量等问题。在过去的 10 多年中，有大量而广泛的工作在多目标跟踪问题上开展。有些研究将多目标跟踪问题看成一个候选区域和已有目标轨迹之间的数据关联（Data Association）问题，例如多假设跟踪器。也有一些研究将跟踪问题看成是贝叶斯状态空间推断问题。数据关联问题可能会涉及，但不是一个必要的部分，例如贝叶斯 multi-Blob 跟踪器。

1.2 机动目标跟踪

机动目标跟踪是 2.1 中提到的目标跟踪中不确定性问题的典型分支。随着监视和反监视技术的竞相发展，特别是由于军事监视环境和目标机动性能发生了很大的变化，使得目标跟踪问题的不确定性更加严重。这就要求机动多目标跟踪系统必须适应机动的变化，同时做出正确的相关决策。通过卡尔曼滤波，对目标运动状态进行估计和预测，来消除目标相关的不确定性，是目前工程上经常应用的方法。

1.2.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种高效率的递归滤波器(自回归滤波器)，它能够从一系列的不完全及包含噪声的测量中，估计动态系统的状态。卡尔曼滤波与最小二乘和维纳滤波等滤波器相比，具有优点：1) 采用状态空间法在时域内设计滤波器，用状态方程描述任意复杂多为信号的动力学特征，避开了在频域内对信号功率谱作分解带来的麻烦，设计简单易行。2) 采用递推算法，实时量测信息经过提炼被浓缩在估计值中，而不必存储时间过程中的量测量。卡尔曼滤波一出现便受到工程界特别是航空界的高度重视，阿波罗登月计划中的导航系统和 C-5A 飞机的多模式导航系统的设计是其早期应用。随着计算机技术的发展，目前卡尔曼滤波的应用几乎涉及通讯、导航、遥感等多个军事应用领域。

卡尔曼滤波器是线性最小方差估计，被认为是线性最优估计理论，经典的卡尔曼滤波方法的思想：(1) 状态变量的引入；(2) 建立状态和测量方程；(3) 用射影方法求最优滤波器。这里不做详细的数学描述，如读者有兴趣可参考文献^[7]。

1.2.2 机动目标卡尔曼滤波

机动目标跟踪基本要素包括量测数据形成与处理、机动目标模型、机动检测与机动辨识、自适应滤波与预测、跟踪坐标系和滤波状态变量的选取等。机动目标跟踪原理框架如图 2.1 所示^[8]。

量测数据形成与处理：量测数据，通常指来自探测输出报告的所有观测量的集合。这些观测量一般包括目标运动学参数，如位置和速度、目标属性、目标类型、数目以及获取量测量的时间序列等。量测数据既可以等周期获取，也可以变周期获取。量测数据大多含有噪声和杂波，为了提高目标状态估计精度，通常采用数据预处理技术以提高信噪比。目前常用的方法有数据压缩，包括等权和变权预处理以及量测资料

中野值的剔除方法等技术。

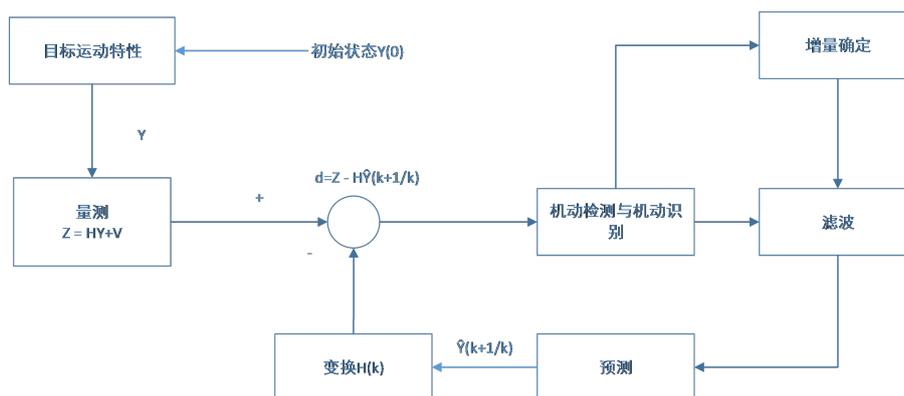


图1 机动目标跟踪的基本原理框图

机动目标模型：机动目标模型是机动目标跟踪的基本要素之一，也是关键棘手的问题。在建立目标模型时，一般的原则是所建立的模型既要符合机动实际，又要便于数学运算。常用的模型有微分多项式模型、CV 和 CA 模型、半马尔科夫模型和时间相关模型等。

机动检测与机动辨识：机动检测与机动辨识是两种机动决策机制，如果目标出现机动，根据此机制即可确定出机动的发生时刻，估计出实际的机动参数譬如机动强度和持续时间等等。

自适应滤波与预测：滤波与预测是跟踪系统的最基本要素，也是估计当前和未来时刻目标运动参数如位置、速度和加速度的必要技术手段。当目标作非机动运动时，采用基本的滤波与预测方法即可很好地跟踪目标。这些方法主要有线性自回归滤波， $\alpha - \beta$ 或 $\alpha - \beta - \gamma$ 滤波以及卡尔曼滤波等。

跟踪坐标系与滤波状态变量的选取：一般地说，有两种坐标系可供选择，一种是直角坐标系，一种是球面坐标系。通常探测器的量测是在球面坐标系中进行的，而目标的状态方程在直角坐标系中则可以线性表示。状态变量的一般选取原则是选择维数最少且能全面反映目标动态特性的一组变量，以防止计算量随状态变量数目的增加而增加。

机动多目标跟踪主要包括机动目标模型与自适应跟踪算法、跟踪门(关联区域)的形成、数据关联、跟踪维持、跟踪起始与终结、漏报与虚警等。其中数据关联是机动多目标跟踪技术中最重要又最困难的方面，由于篇幅原因，在此不做详细介绍。

3 结论和建议

本文通过对目标跟踪和其分支机动目标跟踪技术做了概括性的说明，讨论了国内外研究现状及理论和应用价值，并且简单介绍了目前机动目标跟踪技术常用的卡尔曼滤波技术，并对单目标跟踪和多目标跟踪分别进行讨论。目标跟踪领域是目前国内外研究的热点话题，针对军事化应用的高速度、高性能等特性，基于卡尔曼滤波和基于粒子滤波的机动目标跟踪被证明有效的同时，也存在自身的缺陷，为应对未来军事领域更加复杂的作战环境和反跟踪侦测技术，需要不断探索创新，提出更加符合军事化需求的解决方法。

参考文献：

- [1] 张娟,毛晓波, 陈铁军.运动目标跟踪算法研究综述[J].计算机应用研究. 2009,26 (12) : 4406- 4410.
- [2] 崔宇巍. 运动目标检测与跟踪中有关问题的研究[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- [3] C. Stauffer and W.E.L. Grimson. Learning patterns of activity using realltime tracking[J]. IEEE Trans. on PAMI, 22, 2000.
- [4] G. Hager etl.. Real-time tracking of image regions with changes in geometry and illumination[C]. Proc. CVPR' 96, 1996.
- [5] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer. Kernel-based object tracking[J].PAMI, 25(5):564 - 577, 2003.
- [6] S. Avidan. Ensemble tracking[J]. IEEE Trans. PAMI, 29(2):261 - 271, 2007.
- [7] Y. Bar-Shalom and T.E. Fortmann. Tracking and data association[M]. Academic Press, New York, 1988.
- [8] 唐吉. 卡尔曼滤波算法在强机动目标跟踪中的应用[D].南京: 东南大学, 2008.