

文章编号: 1001-0920(2010)01-0149-04

基于特征约束和均值漂移的机动目标粒子跟踪

李海涛, 吴培良, 孔令富

(燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 粒子滤波是适用于非线性非高斯系统下目标跟踪的强有力工具. MiroSot 足球机器人系统可以作为研究机动目标跟踪问题的平台. 对此, 在分析 MiroSot 系统目标特征的基础上, 提出一种基于目标特征约束的均值漂移粒子滤波算法, 利用约束和优化的思想提高粒子的质量并减少其数量. 对比实验表明, 该方法有效地克服了传统粒子滤波的计算量和粒子退化问题, 保证了多机动目标跟踪的准确性和实时性.

关键词: MiroSot 机器人; 机动目标; 粒子滤波跟踪

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Mean shift-based and feature-restricted particle filter for maneuver targets tracking

LI Hai-*tao*, WU Pei-*liang*, KONG Ling-*fu*

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: LI Hai-*tao*, E-mail: lht@ysu.edu.cn)

Abstract: The particle filter can track targets in the situation of non-linearity and non-Gauss. MiroSot robot soccer system is used as the platform. By analysing the features of targets in this system, a feature-restricted and mean shift-based particle filter algorithm is proposed, in which the thought of optimization from restriction is used to improve the quality of particles and decrease their quantity. The contrast experiments show that the proposed algorithm can overcome the disadvantage of traditional particle filter and track maneuver targets accurately and in real time.

Key words: MiroSot robot; Maneuver target; Particle filter tracking

1 引言

机动目标的跟踪研究一直是目标跟踪领域的研究热点和难点, 性能良好的跟踪系统必须兼顾准确性和实时性, 而这在实际情况中往往难以同时满足. 目前, 针对机动目标跟踪主要有 3 类解决方法: 1) 确定性方法, 这类方法将跟踪视为最优化问题, 从而转化为求代价函数最小值问题, 具有代表性的是 Mean Shift^[1]; 2) 基于随机统计的方法, 这类方法将跟踪问题视为概率估计问题, 以获得状态的最优估计为目的, 基于该思想的粒子滤波解决了非线性非高斯系统的目标跟踪问题^[2,3], 但存在计算量大和粒子退化问题; 3) Hybrid methods 将上述两种方法融合逐渐形成了第 3 类方法, 该类方法具有较高的实时性和准确性^[4-6].

足球机器人系统作为机器视觉和智能控制研究

的完美结合, 为相关领域的研究提供了一个标准平台. 其复杂性主要表现在: 目标数量多、高速机动运动, 且存在色块互干扰等情况. 针对足球机器人系统中目标跟踪问题, 人们尝试了多种跟踪算法, 这些算法对具有较为单一运动方式的球的跟踪具有较好的跟踪效果^[7], 但由于机器人处于高速机动运动状态, 使上述算法难以保证对机器人的可靠跟踪. 除此之外, 多目标之间的颜色互相干扰, 极易造成目标误跟踪. 由于这些问题的存在, 对机器人的跟踪迄今仍然没有很好的解决方法.

本文根据 MiroSot 系统中目标色块的颜色和相对位置特征, 提出一种基于特征约束的均值漂移粒子滤波跟踪算法, 该算法属于上述第 3 类方法 (Hybrid methods). 实验表明, 该跟踪算法具有较高的准确性和可靠性, 并保证了系统的实时性.

收稿日期: 2009-02-03; 修回日期: 2009-04-22.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA04Z212); 河北省教育厅自然科学基金项目 (Z2008473).

作者简介: 李海涛 (1978—), 男, 河北唐山人, 讲师, 博士生, 从事服务机器人、模式识别的研究; 孔令富 (1957—), 男, 吉林公主岭人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、机器人视觉等研究.

MiroSot 系统中的球和机器人都属于跟踪对象,但本文主要针对机动目标的跟踪,故下文出现的目标均指机器人,并假设双方机器人采用相同的色标设计方案.

2 MiroSot 视觉系统及目标特点分析

MiroSot 视觉子系统是一种典型的目标跟踪系统,它通过置于场地上方的摄像头实时采集图像信号,然后送入主机对图像信号进行处理,最后输出机器人和球的位置及运动方向等信息,以供决策子系统调用.图像数据按照离线和在线两种方式进行处理:首先通过人机交互的离线方式将复杂的目标图像进行颜色分割,建立目标颜色查找表和表征目标属性的知识库,并完成场地标定等任务;然后使用在线方式,依据离线建好的颜色查找表和知识库进行实时目标识别,并结合场地标定结果和历史观测数据计算该目标的位置和运动信息.视觉系统图像处理 and 识别原理如图 1 所示,详情可见文献[8].

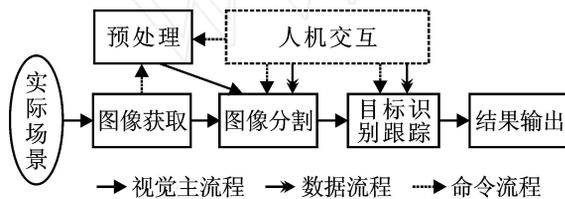


图 1 MiroSot 视觉子系统结构图

在 MiroSot 系统中,目前常用的目标(机器人)色标设计如图 2 所示.该设计方案充分利用了各色块的颜色特征以及色块间的位置关系,最大程度地减少颜色种类,从而实现了存储和识别的优化,并有效地解决了“粘连”问题.基于该色标设计方案的识别算法的核心思想是:逐次搜索图像中目标的队标,以队标中心 O 为原点、队标的长轴和短轴分别为 x 轴和 y 轴,将色标划分为 4 个区域,在每个区域搜索队员标以颜色并与离线设定的目标模板匹配,从而确定目标的编号和方向等信息.文献[9]对该色标的识别算法进行了详细描述,本文假设目标已被准确识别和定位,以此为基础研究对该目标的机动跟踪问题.

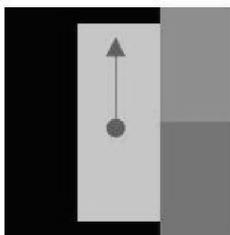


图 2 一种通用机器人色标设计方案

3 机动目标跟踪

如前所述,均值漂移和粒子滤波是两类不同的

目标跟踪方法,两者结合可提高跟踪的精确度和实时性.另外,从图 2 所示色标方案可以看出,本文中目标具有明显的颜色和空间位置特征,通过各色块颜色、面积及其位置关系约束可有效地限定目标范围,为采样粒子发散问题提供了间接的解决途径.基于上述思想并结合 MiroSot 系统中目标的动态模型,本文提出了基于特征约束的均值漂移粒子滤波跟踪算法.

3.1 目标的动态模型

在 MiroSot 系统中目标作自主机动运动,并且系统信号和噪声干扰满足随机过程,在一定条件下,该系统可视为广平稳随机过程^[7]. MiroSot 机器人的动态模型可用数学描述为

$$S = \{x, y, \phi, \dot{x}, \dot{y}\}. \quad (1)$$

其中: (x, y) 是目标的位置坐标(色标中心); ϕ 表示目标的朝向角; \dot{x}, \dot{y} 表示目标在 X 方向和 Y 方向上的速度分量.本文采用 2 阶自回归模型作为目标状态转移方程,即

$$S_t - S_{t-1} = S_{t-1} - S_{t-2} + w_{t-1}. \quad (2)$$

其中: $S_t = [x_t, y_t]$ 为 t 时刻的目标状态; w_{t-1} 为二元高斯随机噪声,有 $w_{t-1} \sim N(0, \Sigma)$.

3.2 系统的观测模型

由于本文目标在垂直于摄像机的水平面内运动,且在整个摄像机视野范围内目标的尺度变化不大,可根据目标的位置及其面积确定搜索窗口 W .另外,在多数时间内目标处于机动运动状态,速度对观测模型的影响不可忽略.充分考虑目标特征并结合其运动速度对目标观测模型的影响,本文采用与文献[4]中类似的方法,将每个采样点的相似度计算由颜色因子和运动因子联合决定.

在颜色查找表与采集图像进行直方图匹配得到的颜色概率分布图像中,通过计算目标窗口 W 内像素的零阶矩得到颜色因子

$$M_c = \int_x \int_y I_c(x, y). \quad (3)$$

通过相邻帧间差分图像中目标窗口 W 内像素的零阶矩得到运动因子

$$M_m = \int_x \int_y I_m(x, y). \quad (4)$$

在式(3)和(4)中, $I_c(x, y)$ 和 $I_m(x, y)$ 分别表示颜色概率分布图像和差分图像中坐标 (x, y) 处的像素值, (x, y) 在 W 内取值.

另外,当目标高速运动时,运动因子对状态观测模型影响较大;而当目标运动较慢时,颜色因子对观测状态起决定作用.所以,将颜色因子和运动因子作如下加权综合:

$$M = (1 - \alpha)M_c + \alpha M_m, \quad (5)$$

其中系数 w 与目标的运动速度成正比, 即 $w = \sqrt{x^2 + y^2}$. 用颜色与运动因子的加权和来表示目标与样本之间的距离, 即

$$Dis = \sqrt{1 - M/M_t}, \quad (6)$$

其中 M_t 为目标窗口 w 内的像素总数. 由此, 得到采样点 i 的相似度为

$$w^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{Dis^2}{2}}, \quad (7)$$

其中 σ 为高斯标准差.

3.3 基于特征约束的均值漂移粒子滤波跟踪

特征约束是指根据目标色块的颜色、面积和相对位置特征, 将目标的搜索范围约束在特定区域. 均值漂移算法通过反复迭代求解表征目标对象和候选对象之间相似度的最优值, 使搜索点沿着样本点密度梯度的方向“漂移”到局部密度极大值^[1]. 本文提出一种基于特征约束和均值漂移的粒子滤波跟踪算法, 通过特征约束使采样粒子尽可能落在目标上, 并结合均值漂移的思想使粒子向局部极值点“漂移”, 从而保证了粒子的质量和有效性, 同时大大缩减了完成跟踪所需的粒子数量.

假设在 $t - 1$ 时刻已经根据特征匹配识别出目标的编号、位置和角度等信息, 并通过特征约束得到目标窗口内的粒子样本集 $S_{t-1} = \{(S_{t-1}^{(i)}, \theta_{t-1}^{(i)}) \mid i = 1, \dots, N\}$, 在 t 时刻完成如下步骤:

- 1) 状态更新: 由 $S_t - S_{t-1} = S_{t-1} - S_{t-2} + w_{t-1}$ 得到 t 时刻的样本集 S_t ;
- 2) Mean Shift: 对每个样本进行 Mean Shift 迭代, 使粒子向局部极值点移动;
- 3) 权值更新: 综合颜色和运动因子对当前样本的权值进行更新

$$w^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{Dis^2}{2}};$$

- 4) 状态估计: 计算样本集 S_t 的均值

$$E[S_t] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_t^{(i)};$$

- 5) 目标识别: 结合估计状态和目标特征进行匹配识别.

3.4 跟踪丢失处理

目标跟踪丢失是指在当前搜索窗口内没有识别到所要跟踪的目标. 由于噪声干扰、光线变化以及目标之间的碰撞与遮挡(主要是小球被机器人遮挡)等原因, 跟踪丢失难以完全避免, 甚至可能在若干帧内连续丢失. 在 MiroSot 系统实时运行过程中, 当出现目标跟踪丢失时应及时作出调整, 使系统能够尽快恢复对该目标的识别与跟踪, 以保证场上机器人的可控性和系统运行的流畅. 可见, 除了设计实时可

靠的跟踪算法外, 还必须设计完善的跟踪丢失处理方案. 当系统实时运行过程中出现跟踪丢失情况, 本文采取如下处理措施:

- 1) 对于机器人的跟踪丢失, 将估计状态作为当前状态, 并在下一帧中全局搜索该目标.
- 2) 对于球的跟踪丢失, 判断当前搜索窗口内是否有机器人存在. 若搜索窗口内存在机器人, 则认为小球被遮挡, 将机器人的位置作为小球的位置; 若没有机器人存在, 则将估计位置作为小球的当前位置, 并在下一帧中全局搜索小球.

4 实验与分析

实验 1 首先对单个机器人进行实验. 设置指令使其在摄像机视野范围内机动运动, 并分别采用粒子滤波算法、均值漂移算法和本文算法对其进行跟踪.

传统粒子滤波算法由于没有将目标当前时刻的观测数据应用到重要性密度函数中, 使状态更新较多地依赖于滞后的系统模型, 对于目标高速机动运动极易造成跟踪丢失和重采样范围扩散, 随即导致计算量激增, 严重影响了系统实时性.

而本文方法首先通过特征约束将粒子采样范围限定在目标周围邻域, 再结合均值漂移使各粒子向其邻近的局部极值点移动. 由于确保了采样粒子的有效性, 从而相应提高了跟踪的准确性和实时性. 本文方法和传统粒子滤波方法的对比实验如图 3 所示.

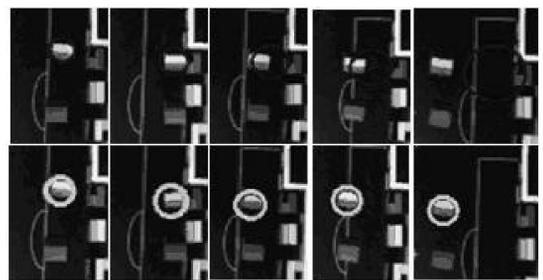


图 3 传统粒子滤波(上)和本文方法(下)的跟踪对比

均值漂移算法是一种最优梯度下降法, 通过迭代的方法在一定窗口内搜索目标. 当机动运动目标的中心移出搜索窗之后, 将很容易导致跟踪丢失. 本文方法结合了粒子滤波“多峰”跟踪以解决跟踪丢失问题, 保证了对目标稳定可靠的跟踪. 本文方法和均值漂移算法的对比实验如图 4 所示.

实验 2 对足球机器人比赛中的目标进行实时跟踪. 实验所用主机配置为 Pentium 4 2.6 G, 内存为 1 G, 摄像机采集图像分辨率为 640 × 480. 针对本文所建立的目标模型, 为保证目标跟踪的可靠性, 传统粒子滤波至少需要 200 个粒子, 严重影响了系统

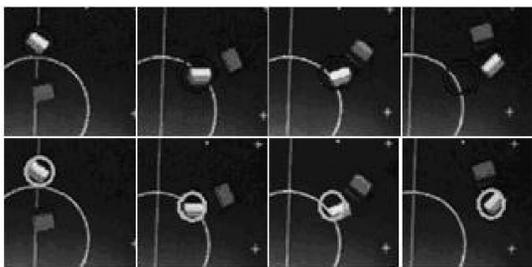


图4 均值漂移算法(上)和本文方法(下)的跟踪对比的实时性.而本文方法在粒子滤波中引入目标特征约束和均值漂移算法,只需约20个粒子即可实现对目标的准确跟踪,并将系统运行周期保证在33ms左右.由于同时具备较高的实时性和准确性,并结合了及时有效的丢失跟踪判断与处理,本文方法已成功应用于MiroSot系统的多机动目标跟踪.图5为MiroSot3对3的比赛中蓝队队员带球进攻时对场上多目标的跟踪.

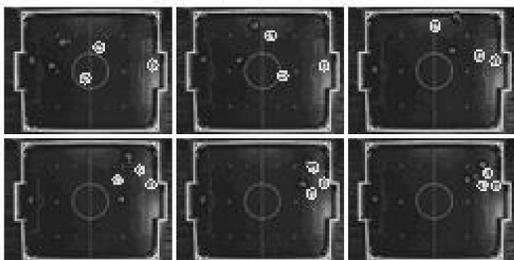


图5 本文方法对多机动目标的实时跟踪

5 结论

MiroSot足球机器人系统是研究多机动目标跟踪问题的良好实验平台,在MiroSot系统实时运行过程中,对高速机动目标预测与跟踪的准确性将直接决定后续的避障、拦截等任务的成败.本文以MiroSot系统为平台研究多机动目标的跟踪问题,结合确定性方法和概率统计方法的优点,提出了一种基于特征约束的均值漂移粒子滤波跟踪算法,实现了对多机动目标的实时跟踪.相关研究可直接应用于公共场所监控及体育视频等领域的多目标机动运动跟踪.

参考文献(References)

[1] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of

non-rigid objects using mean shift [C]. IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island, 2000, II: 613-624.

[2] Isard M, Blake A. Condensation-conditional density propagation for visual tracking [J]. Int J of Computer Vision, 1998, 29(1): 5-28.

[3] Arulampalam M, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(2): 174-188.

[4] Shan Can-feng, Wei Yu-cheng, Tan Tie-niu, et al. Real time hand tracking by combining particle filtering and mean shift [C]. The 6th IEEE Int Conf on Automatic Face and Gesture Recognition. Seoul: IEEE Computer Society, 2004: 669-674.

[5] Maggio E, Cavallaro A. Hybrid particle filter and mean shift tracker with adaptive transition model [C]. Proc of IEEE Signal Processing Society Int Conf on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia, 2005: 501-508.

[6] Deguchi K, Kawanaka O, Okatani T. Object tracking by the mean-shift of regional colour distribution combined with the particle-filter algorithm [C]. The 17th Int Conf on Pattern Recognition. Cambridge, 2004: 506-509.

[7] 王文学, 王强, 孙萍. 卡尔曼滤波在机器人足球比赛系统中的应用 [J]. 机器人, 2006, 28(4): 410-414.

(Wang W X, Wang Q, Sun P. Application of Kalman filter to centralized robot-soccer competition system [J]. Robot, 2006, 28(4): 410-414.)

[8] 李庆赞, 刘云辉, 徐心和, 等. 基于网络的足球机器人比赛系统的研究与实现 [J]. 机器人, 2006, 28(6): 610-616.

(Li Q Y, Liu Y H, Xu X H, et al. Development of an internet-based robot soccer competition system [J]. Robot, 2006, 28(6): 610-616.)

[9] 彭强, 江浩. 大场地足球机器人视觉子系统及其识别算法 [J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 168-172.

(Peng Q, Jiang H. Vision subsystem and identification algorithm for miroSot large field soccer-robot system [J]. J of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(2): 168-172.)