

球类比赛中运动员的实时跟踪

Realtime Athletes Tracking in Ball Game

沈乐君¹,柯遵渝¹,程小平²

Shen Le-jun¹, Ke Zun-yu¹, Cheng Xiao-ping²

摘要: 使用计算机跟踪球场中的运动员,得到每个球员的时序位置信息,是研究其体能和技战术特点,辅助教练员进行科学训练的关键技术。运动场景中的目标跟踪方法有其特殊性。本文介绍了运动员实时跟踪的软件结构,研究了球类比赛中,目标跟踪的特征选择、状态转换和实现方法、并以足球为例进行试验。试验结果证明,对多个运动员进行跟踪,算法是鲁棒而快速的。对多个运动员进行跟踪时,每秒帧数(fps)可以达到30。

关键词: 球类; 比赛; 目标跟踪; 卡尔曼滤波; 粒子滤波; 均值平移;

Abstract:

The tracking system is very important for the sport training and analysis of athletes. It's the basic step of the computer aid coaching system. This paper present a system for real-time athletes tracking in soccer game. The algorithm is explained on feature selection, observation equation, state equation, and implement details. Experiment results show that the tracking is robust and fast, can tracks multi-athlete at 30 fps.

Key Words: Ball game; object tracking; Kalman filter; Particle filter; mean-shift;

基金项目：四川省体育局科研项目（05STK013）

作者简介：

沈乐君（1976-），男，重庆人，讲师，硕士，毕业于西南大学计算机应用技术专业，研究方向为计算机视觉在运动训练中的应用，Tel(028)86412928;

柯遵渝（1953-），男，四川成都人，教授，硕士，毕业于上海体育学院运动训练专业，研究方向为体育测量与评价;

程小平（1955-），男，重庆人，教授，博士，毕业于重庆大学自动化专业，研究方向为人工智能与模式识别。

作者单位：

1 成都体育学院,四川成都,610041;

2 西南大学计算机与信息科学学院,重庆,400715

作者单位：

1 Chengdu Sport University, Sichuan Chengdu,610041

2 School of Computer & information, Southwest University,Chongqing 400715

1 前言

田麦久将球类比赛归为战术重要性要求最高的项目^[1]。为了研究对手、操控比赛、进而帮助教练员夺取胜利，竞赛现场信息的采集成为重要的问题^[2]。本文利用计算机视觉技术实时采集、分析和呈现球场上运动员的运动，有助于研究比赛的“制胜问题”。

如果将球类比赛认定为复杂系统，那建立其统计模型并详加探讨，是一种重要的研究方法，如张辉利用马尔可夫链模型研究乒乓球比赛的获胜概率^[3]。本文引入了运动员的贝叶斯运动模型，并以此来跟踪球场上运动员，获取其时序位置信息。

一直以来，研究者们都在研究通过各种技术手段，获得运动目标的位置信息。如使用GPS帮助教练员追踪赛艇训练中的量化参数^[4]，采用无线电技术监控马拉松比赛选手^[5]，利用红外传感器分析赛车位置等。它们要求受试对象携带特定的装备，这不但会给运动员带来心理和生理上的影响，而且，因为缺乏受试者配合，无法研究国外运动员的数据。

相反，由于摄像机在拍摄过程中无需受试者配合，使得研究者们对使用图像手段亲睐有加。如刘翔备战奥运会中图像解析的运用^[6]，为中国跳水队设计的视频分析辅助训练系统^[7]等。本文对比分析了常见的几类视觉跟踪方法，研制了单摄像机拍摄的、针对非刚体运动员的自动跟踪方法，可以对多名运动员实时跟踪。

获得运动员时序位置序列后，就可以得到关于体能、技术、战术的大量信息。以商用足球 SCOUNT 系统为例，英国 ProZone 公司为英超联赛的大部分球队提供体育统计信息服务。它通过在球场上架设 8 个摄影机，把球场上的所有球员拍摄下来，然后用很长时间，在电脑上详细标记每名球员的位置、事件，以报告的形式向主教练们提供大量的数值和可视化信息，包括：比赛模拟三维动画、球员奔跑距离、运动轨迹、跑动速度、过人次数、传球次数、射门次数等。图 1 是 ProZone 提供的某次比赛中贝克·汉姆的全场运动轨迹图，这是无法通过“看”比赛就能获得的。

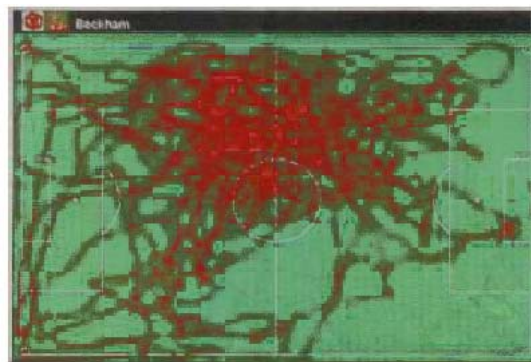


图 1 贝克·汉姆全场运动轨迹图

但是，安装一套这样的系统十分繁琐，且由于缺乏自动跟踪方法，投入统计的人力成本高，分析时间长，费用非常昂贵。本文研究的自动化跟踪方法，可以降低统计分析过程的人力投入，缩短位置标定时间，同时还可避免多摄像机带来的不便和调试麻烦。

和本文研究相关的，还有麻省理工学院的S.S.Intille对橄榄球队员的目标跟踪与识别^[8]，欧盟资金支持的ASSAVID项目中，对足球比赛的图像分析和理解^[9]，视频监控中的目标跟踪算法^[10]，多目标视觉跟踪算法^{[12][13]}等。

本文中提到的实时性，指计算机求解问题所消耗的时间较短，能够对输入的

数据及时作出响应。例如，DVD 解码程序每秒处理 24 帧画面，才能保证播放画面流畅无停顿。实时性与多种因素有关，如计算机 CPU 频率、指令集、内存、算法复杂度、总线速度等。

总之，本论文研究的算法能够对宏观的、长时间拍摄的视频，尤其是球类体育项目的视频，进行多目标实时跟踪。研究有助于对训练和竞赛现场进行实时监控，有助于对体能和战术进行分析和统计，有助于获得运动量等评价参数，可以为教练员提供决策数据支持，为研究者提供有价值的情报。

2 软件架构

在PC机上实现实时跟踪的技术基础是DirectX技术。本系统首先使用视频采集设备和操作系统提供的Filter，来控制视频、音频设备，处理视频数据的采集、解压和向屏幕显示。接着，在“图管理器”中，插入我们编写的Filter^[14]，逐帧对图像进行处理。

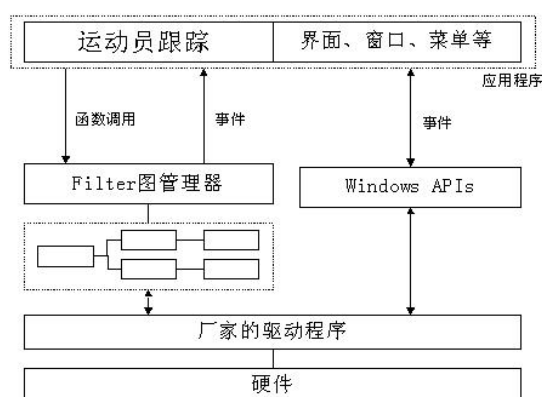


图 2 软件架构

3 运动员实时跟踪方法

3.1 基本模型

目标跟踪可以用贝叶斯滤波来描述。贝叶斯滤波的实质是试图用所有已知信息来构造系统状态变量的后验概率密度。它包含预测和更新两个步骤。假设目标的状态是一阶马尔可夫过程， x 是状态向量， z 是观测向量，下面是贝叶斯滤波的递归形式：

$$p(x_t | z_{1:t}) = \propto p(z_t | x_t) \int_{x_{t-1}} p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | z_{1:t-1}) dx_{t-1}$$

递归贝叶斯滤波有多种实现方法，将在后文探讨。

3.2 特征选择

要实现递归贝叶斯滤波，图像的特征选择很关键。由它构成观测向量 z 。目前，可以使用基于灰度特征的模板方法、基于轮廓特征的方法、基于 Gabor 小波的方法，基于特征点的方法等。对比这些方法后发现：由于运动员运动激烈，姿态变化多，存在平移、旋转和非仿射变形，所以简单的基于相关度的方法较难应用。由于运动员是非刚体的，除头部轮廓外，总体轮廓常常发生变化，故轮廓跟踪也难实现。另外，运动员的特征点虽然比较多，但由于运动变向和转身，容易丢失特征点，所以基于特征点方法，也不很理想。

分析采集的视频后，可以观察到，在一场比赛中，“运动员”的主体色彩常

常是均一且恒定的。可以假设，目标特征在色彩空间中是聚类的，且随着时间相对稳定。所以，本文采用了基于HSV颜色空间^[15]的相关度方法。

实际提取特征时，我们做了两点修正。第一，剔除亮度小于 30 的非色彩像素，因为它们会导致 HSV 空间分布不正常。第二，对矩形窗口内特征概率分布进行归一化处理。

3.3 观测似然方程和背景消除

设t时刻的图像为 I_t ，m个目标 $\Omega = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ ， $h()$ 为特征提取函数，D为 Bhattacharyya 相似度。 $h(I_0, z_0)$ 的参数通过对目标初始位置进行学习得到^[15]。下面是观测似然方程。

$$p(z_t | x_t) = \propto e^{-\lambda D^2[h(I_0, z_0), h(I_t, z_t)]}$$

为了提高算法鲁棒性和实时性，常常建立背景模型^[10]。因为体育场景的背景较单一，所以由用户定义多个背景矩形，得到背景b的色彩空间分布 $h(I_0, b)$ ，然后从z中减去背景b。修正公式如下，观测似然方程也作同样的修正。

$$h'(I_t, z) = h(I_t, z) - h(I_0, b)$$

$$p'(z_t | x_t) = \propto e^{-\lambda D^2[h'(I_0, z_0), h'(I_t, z_t)]}$$

3.4 状态转换

贝叶斯滤波包含预测和更新两个步骤。为了预测目标的先验概率，需要建立系统状态转移方程。设状态向量为 x ，状态转移矩阵为 A ， W 为噪声。系统状态方程为：

$$x_t = A \cdot x_{t-1} + W$$

在得到实际观测值 z 后，为了得到状态的后验概率，需要建立观测方程，求 z 的观测概率。设 H 为观测矩阵， V 为噪声，观测方程为：

$$z_t = H \cdot x_{t-1} + V$$

x 和 y 为位置坐标， s 为放缩系数， t 为时间常数，矩阵设计如下：

$$X^T = \begin{bmatrix} x \\ v_x \\ y \\ v_y \\ s \\ v_s \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1, t, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 1, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 0, 1, t, 0, 0 \\ 0, 0, 0, 1, 0, 0 \\ 0, 0, 0, 0, 1, t \\ 0, 0, 0, 0, 0, 1 \end{bmatrix}, \quad H^T = \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 0, 0, 0 \\ 0, 0, 1, 0, 0, 0 \\ 0, 0, 0, 0, 1, 0 \end{bmatrix}$$

3.5 跟踪算法选择

实际计算贝叶斯滤波递归公式时，其中的积分往往很难实现。但在某些限制条件下，有几种实现方法，如卡尔曼滤波器^[17]和粒子滤波器^[11]。

在系统线性、噪声和后验概率为高斯分布条件下，卡尔曼滤波器是最优估计。由于它可以用矩阵运算快速实现，符合实时性的需要，所以应用范围非常广泛。但实际情况中，多个目标在运动时，目标之间可能会相互干扰、遮挡和重叠，导致跟踪算法失败。对于这样的非线性非高斯的系统，不能直接用卡尔曼滤波器来

求解。

于是，人们研究出各种非线性滤波算法，来解决非线性非高斯问题。近年来出现的粒子滤波器，利用一系列随机样本及其权重来计算状态的后验概率。当样本足够多时，可逼近于最优估计。粒子算法优点是鲁棒性好，适合处理多个运动员互相遮挡的情况，如图 3 中 A 穿黄色球衣运动员被穿红色球衣运动员遮挡前，B 表示遮挡后， A_2 和 B_2 为粒子示意图。使用马尔可夫随机场 $MRF^{[12]}$ 和 $MCMC^{[13]}$ 改进后的粒子滤波算法，可处理目标数可变、目标叠加等问题。但是，缺点是计算量大，以目前的运算水平还无法做到实时跟踪。

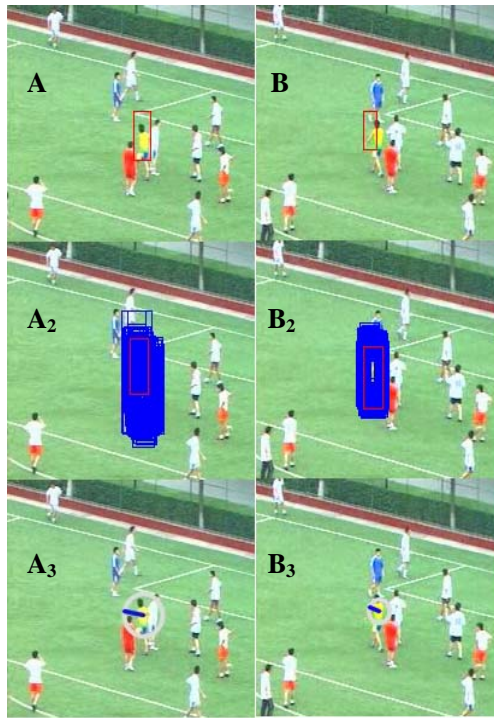


图 3 部分遮挡的目标跟踪

此外，均值平移(mean shift)算法是一种用密度梯度爬升来寻找概率分布峰值的非参数方法。它常用于目标跟踪^[16]，优点是计算量小，对多个运动员互相部分遮挡具有鲁棒性（图 3 中 A_3 为遮挡前， B_3 为遮挡后），但容易陷入局部最大值。本文将均值平移法和卡尔曼滤波结合，简称为 MK。作为对比，在相同特征提取方式、状态转换方程条件下，将 MK 和粒子滤波器的计算性能进行了对比，如表 1。可以看出，优化后的 MK 算法满足实时性的要求，每秒帧数可达 30。在粒子数量较少时，粒子滤波算法也能胜任，每秒帧数在 22 左右。

表 1 不同算法计算性能对比表

算法名称	MK	50 粒子滤波	100 粒子滤波	500 粒子滤波
平均每帧计算时间 (单位：毫秒/每帧)	9.38	28.93	30.34	45.85

4 试验和结论

试验的硬件和软件基础：P4 1.7G，512M 内存，数字摄像机，视频采集卡，DirectX 开发包^[14]，图像处理函数库。试验地点：成都体育学院足球场。对拍摄的多次足球比赛中的 28 种不同队服的队员进行试验。

跟踪结果演示。图 4 为运动员尾迹图，也就是 5 秒以内队员的运动轨迹，可以看出运动的剧烈程度。图 5 为运动员速度图，白色圆圈代表速度，灰色线段代表速度方向，速度越快白色圆圈半径越大，可以看出瞬时速度的大小。



图 4 运动员尾迹图



图 5 运动员速度图

图 6 为位置标定图和全场轨迹图。左图中，运动员右上角的数字为标定的屏幕X-Y坐标，随时间不断变化。右图中，3 条轨迹为队员的跑动路线。左图中底部dt参数，是采用SSE指令进行向量优化^[18]后，同时对 3 个运动员进行跟踪，每帧图像处理需要的CPU计算时间，平均在 16 毫秒左右。

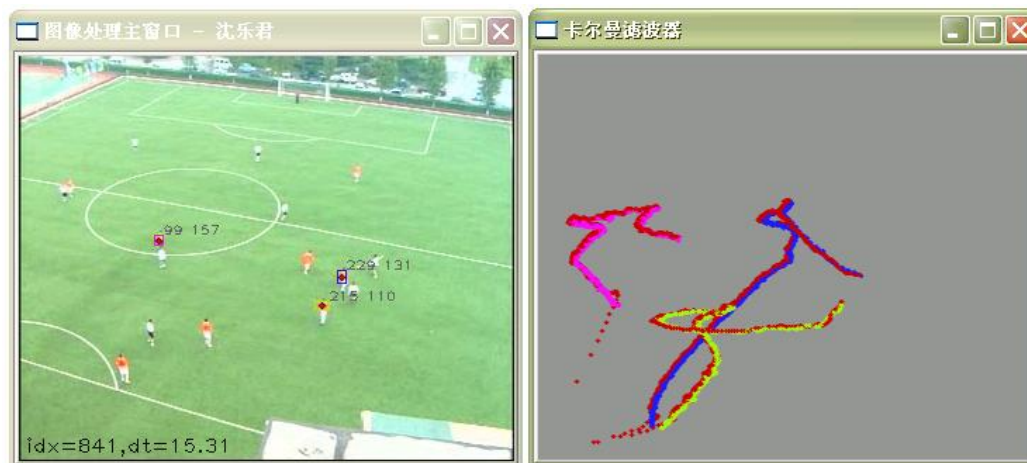


图 6 位置标定图和全场轨迹图

粒子滤波器算法的粒子存活率分析。分别选择图 6 中的裁判员和某运动员，结果如图 7 和图 8 所示。图 7，裁判员被冲突、光学噪声等因素干扰，第 400、600、850 帧左右时，粒子存活率持续低于 0.01，然后恢复正常。图 8，A 队某队员由于特征显著，粒子存活率波动小，在部分遮挡时有所下降。这说明，所选特征的稳定性，目标间的相互遮挡情况，都对跟踪性能有很大的影响。同时，这也证明粒子滤波的鲁棒性很高，适合对球类比赛中运动员等复杂运动目标的跟踪。

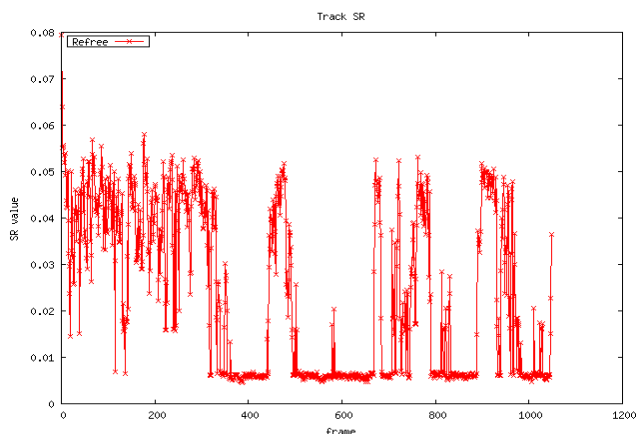


图 7 裁判员粒子存活率

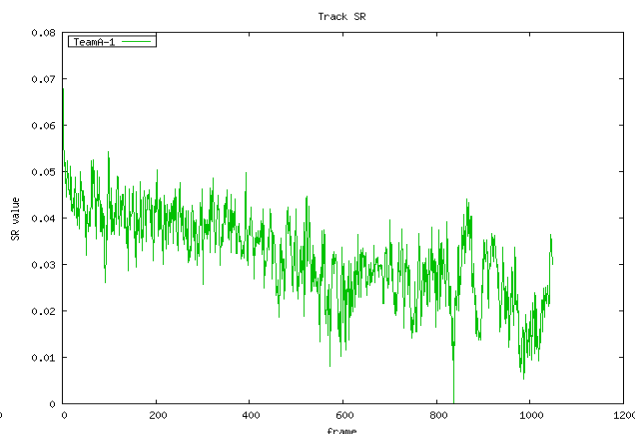


图 8 某队员粒子存活率

5 进一步的工作

在完成本文的目标跟踪算法后,已得到了队员的时序位置信息,自动计算了各个目标的运动参数,如瞬时速度、轨迹等。可以进一步研究技战术和体能^[19]评价指标,如奔跑总长度、平均速度、对抗激烈度、比赛习惯占位等。还可以更进一步研究各种评价方法,如:进攻方的进攻路线分析、防守方的防守盲区分析、队员配合的相关系数分析等。

多个目标的冲突(occlusion)问题,是计算机视觉研究的热点^{[13][20]}。在体育运动中,这种因比赛对抗导致的冲突更加频繁。MK和粒子算法在非遮挡情况下跟踪性能稳定,对部分遮挡具有鲁棒性,但是,在相似目标冲突时都有目标丢失的问题。下一步,将继续研究适合多目标实时跟踪的冲突解决算法或策略。

参考文献:

- [1] 田麦久. 运动训练科学化探索[M]. 北京:人民体育出版社,1988 :509.
- [2] 刘建和. 运动竞赛学:现状与重点关注问题[J]. 北京体育大学学报,2004,27(9):1262-1263.
- [3] 张辉,霍赫曼·安德烈亚斯. 球类比赛数学模拟竞技诊断的理论与实践—以乒乓球比赛分析为例[J]. 体育科学,2005,25(8):39-44.
- [4] 付永吉,过静琚,聂志锋等. 应用 GPS RTK 技术检测赛艇运动信息[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2003,43(3):307-309.
- [5] 李风华,王琰. 竞技体育与信息技术[J]. 广州体育学院学报,2004,24(4):21-24.
- [6] 李汀,李爱东,钱风雷等. 对刘翔备战第 28 届奥运会的综合攻关与服务[J]. 体育科学,2006,26(3):26-31.
- [7] 谢路,廖庆敏,陈小平. 跳水技术训练视频分析与快速反馈系统的设计与应用[J]. 中国体育科技, 2005,41(5):104-107.
- [8] S.S. INTILLE and A.F. BOBICK. A Framework for Representing Multi-Agent Action from Visual Evidence[M]. Orlando USA:American Association for Artificial Intelligence,1999. 518-525.
- [9] JÜRGEN ASSFALG, MARCO BERTINI. Semantic annotation of soccer videos: automatic highlights identification[M]. New York USA:Elsevier Science Inc,2003. 285-305.
- [10] 方帅,迟健男,徐心和. 视频监控中的运动目标跟踪算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1388 - 1391.
- [11] DOUCET, DE FREITAS, and GORDON. Sequential Monte Carlo Methods in Practice[M].

New York USA: Springer, 2001:10.

[12] 薛建儒,郑南宁,钟小品. 多目标跟踪的序贯分层抽样信任传播算法[J]. 中国科学 E 辑,2005,35(10):1049-1063.

[13] ZIA KHAN. MCMC-Based Particle Filtering for Tracking a Variable Number of Interacting Targets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2005,27(11): 1805-1918.

[14] 陆其明. DirectShow 开发指南[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[15] JONES M J , REHG J M. Statistical color models with application to skin detection[J]. International Journal of Computer Vision,2002,46(1):81-96.

[16] G.R.BRADSKI. Real Time Face and Object Tracking as a Component of a Perceptual User Interface[M]. Washington USA :IEEE Computer Society,1998. 214.

[17] KALMAN,R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering. 1960, 82(11):35-45.

[18] 钱昌松,刘志刚,刘代志. 基于 SSE 指令的大内存快速拷贝[J]. 计算机应用研究. 2005, 22(2):117-118.

[19] 任建生,曾丹,凌波. 足球运动员专项体能评定方法的研究[J].体育科学,2004, 24(5):49-52.

[20] CHENG CHANG, RASHID ANSARI, ASHFAQ KHOKHAR. Multiple Object Tracking with Kernel Particle Filter[M]. San Diego CA:IEEE Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR'05), 2005. 566-573.