

参赛队员姓名： 陈远舟

中学： 上海民办包玉刚实验高中

省份： 上海市

国家/地区： 中国

指导教师姓名： 严骏驰

论文题目： 基于单目视觉的网球出界判断方法研究

2020 S.-T. Yau High School Science Award

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员： 陈远舟 指导老师： 严骏驰

2020 年 09 月 12 日

2020 S.-T. Yau High School Science Award

基于单目视觉的网球出界判断方法研究
**Research on ELC (Electronic Line Calling) of Tennis
based on Monocular Vision**

陈远舟

s17680@ykpaoschool.cn

上海民办包玉刚实验高中

2020 S.-T. Yau High School Science Award

摘要

电子线审 Electronic Line Calling (ELC) 是网球比赛中的一种辅助裁判系统，一般称为鹰眼系统，是基于双目视觉原理及图像处理技术，检测网球运动轨迹并预测网球弹跳点，通过对比网球弹跳点和场地三维坐标关系判断网球落点是否出界。目前鹰眼系统在职业网球比赛中得到了广泛的应用，但双目视觉鹰眼系统也存在安装/维护复杂，成本高昂等问题。

针对上述问题，我们提出一种基于单目视觉的 ELC 方法，方法流程如下：(1) 首先定位网球运动轨迹；针对颜色法定位网球漏判的问题，我们提出一种结合背景减除法和颜色区域过滤法的二阶段网球定位方法；(2) 然后根据网球弹跳点前后轨迹的变化特点，我们提出了一种基于不确定点最小拟合损失的弹跳点预测方法；(3) 最后根据二维图像中弹跳点与球场边线的相对位置关系来判断是否出界。

为了验证上述方法，我们首先采集并标注了 394 段样本，然后实现了代码进行实验，判断是否出界的准确率是 99.5%，在其中易混淆 11 个样本（弹跳点离场地线非常近）中，我们得到 81.8% 的准确率。实验结果表明，我们的方法通过采用常见的摄像头，无需双目视觉复杂的安装及标定步骤，在网球出界判断具有一定的可行性。

关键词：鹰眼，电子线审，双目视觉，单目视觉，弹跳点预测

2020 S.-T. Yau High School Science Award

Abstract

Electronic Line Calling (ELC) is an auxiliary referee system in tennis matches, commonly known as the hawk-eye system. Based on binocular vision technology and image processing technology, it detects the track of tennis ball's movement and predicts the bouncing point of tennis ball. After comparing the coordinates between the bouncing point of tennis ball and the three-dimensional coordinate of the court, it can determine whether the tennis ball is out of bounds or not. Recently, hawk-eye system has been widely used in professional tennis competition, but there are some problems. For example, complex installation and maintenance, high cost and etc.

To solve the above problems, we propose an ELC method based on monocular vision. The procedure is as follows : (1) locate the tennis ball's trajectory; In order to solve the problem that the color-filtering algorithm will leave out some possible tennis balls' picture, we propose a multistage tennis ball positioning method combining background subtraction and color area filtering. (2) Then according to the characteristics of the trajectory changes before and after the bouncing point, we propose a bouncing point prediction method based on the minimum fitting loss of the uncertain point; (3) Finally, find out whether the bouncing point of the ball is out of bounds or not according to the relative position between the bouncing point and the court side line in the two-dimensional image.

In order to verify the above method, we first collected and marked 394 samples, and then implemented the code for experiments. Among the 394 samples, we achieved 99.5% accuracy, and among the 11 samples that near the line, we obtained 81.8% accuracy. The experimental results show that our method is feasible to judge the boundary of tennis by using monocular vision instead of binocular vision with complex installation and calibration steps.

Index Terms: Hawk-eye, Electronic Line Calling (ELC), Binocular vision, Monocular vision, Bouncing point prediction

目录

1. 绪论	2
1.1 研究意义	2
1.2 相关研究工作	2
1.3 本文工作	6
2. 我们的方法	7
2.1 总体思路和流程	7
2.2 网球定位方法	8
2.3 网球弹跳点预测方法	10
3. 实验	12
3.1 实验说明	12
3.2 实验结果及讨论	13
4. 结论及展望	15
4.1 结论	15
4.2 展望	15
5. 参考文献	16
6. 致谢	18

2020 S.-T. Yau High School Science Award

1. 绪论

1.1 研究意义

鹰眼系统是一种即时回放系统。通过高速高质量的摄像机和计算机视觉技术跟踪并记录球体的轨迹,并将其预测上最可能的球体运动路径及弹跳点以动态图像的形式虚拟重放,清晰地展现给观众和球员。鹰眼系统可从多角度展现比赛,克服人眼判断的诸多盲区,提高裁判判决的准确性,以及比赛的公平性;此外,鹰眼系统可分析击球数据与球手技能的优势劣势,提供球类运动教学参考。鹰眼系统不仅仅在网球,足球、板球、网球、篮球、羽毛球、橄榄球、棒球、排球、台球等体育项目中也有广泛的应用。

首个鹰眼系统是由索尼收购的 Hawk-Eye Innovations 开发的。该系统最初于 2001 年实施,用于板球比赛的电视转播。而后鹰眼系统开始应用于多种球类比赛的辅助判罚。2005 年,鹰眼系统的 Electronic Line Calling (ELC) 技术被国际网球联合会 (ITF) 认可。2006 年,美国网球公开赛成为第一个引入鹰眼辅助裁判系统的大满贯赛事。而后,中国网球公开赛每年也开始引入鹰系统。2009 年起,板球运动赛事也引入了鹰眼裁判系统,在 2013-14 赛季的英超联赛中推广使用门线技术手段的鹰眼系统,2014 年世界女排锦标赛上,鹰眼系统也被投入使用。

鹰眼系统在体育比赛中的使用越来越普及,今年 8 月开始的美国网球公开赛,只有阿瑟·阿什和阿姆斯特朗两个球场仍采用传统的人工线审,其余 15 个球场均首次引入鹰眼直播系统,比赛场内只有一名主裁,以最大限度减少赛场内的工作人员数量。正好在本文截稿日时间,本次美网比赛发生的德约科维奇在 1/8 决赛中由于误伤线审裁判被罚退赛事情,也许会进一步推动 ITF 减少人工线审,推动鹰眼直播系统的大规模应用。

1.2 相关研究工作

1.2.1 商业鹰眼系统调研

目前有三家相对成熟的研发网球鹰眼系统的企业,分别为:(1)用于职业比赛的英国公司 Hawk-Eye Innovations (简称 Hawk-Eye) [12];(2)用于专业网球俱乐部的以色列公司 PlaySight[13];(3)用于业余网球比赛的便携式 Electronic line calling (ELC) 设备的法国公司 In/Out[14]。

Hawk-Eye 是第一个开发鹰眼系统的公司,有多年的研究 Electronic Line Calling (ELC) 技术的经历,Hawk-Eye 的鹰眼系统是第一个也是唯一一个通过国际网球联合会 ITF 严格测试措施的产品,该产品现已成为 ATP、WTA 和 ITF 网球

巡回赛唯一指定产品,在整个网球赛历的 80 多项赛事中都有应用。PlaySight 是一家以色列的创业公司,他们的网球鹰眼系统 SmartCourt System 主要在大学及专业网球俱乐部中应用。In/Out 主打便携式 ELC 设备。

这三家系统对比如下:

公司	产品	套件	报价 ⁴		精度
			每套 (美元)	后续费用	
Hawk-Eye	ELC Technology	10 个摄像头	\$60,000	\$3000/ 场 比赛	<3mm
PlaySight	SmartCourt system	10 个摄像头	\$10000(室内) \$12500(室外)	\$7000-15000/年	NA
In/Out	In/Out v2.0	2 net devices 2 line devices	\$599	不需要	<20mm

从上述系统对比可以看到,Hawk-Eye,PlaySight 两个公司的系统比较昂贵,不仅包括初始设备费,后续每年、甚至每场比赛都需要额外再收费;In/Out 的产品价格没问题,但根据自己在多个网球队和俱乐部的调研,目前在国内用的还很少,后续我们也计划采购一套 In/Out 作为研究分析用。

1.2.2 基于双目视觉的鹰眼系统原理及流程调研

文献[26, 9]讲述了网球鹰眼的基本原理和关键技术,文献[27]是关于鹰眼系统的一项美国专利,同时也讲述了网球鹰眼系统的流程,硕士论文文献[11]实现了一个基于双目视觉的网球鹰眼系统,文献[10]基于 LabVIEW 平台、MATLAB 软件实现了一个网球鹰眼系统。

综合上述相关文献调研,双目视觉鹰眼系统原理如下使用多个在不同位置的高速摄像机连续拍摄多个视角的图像,利用图像处理技术对每一帧的画面中球体目标进行识别,得出与球的图像相对应的像素组,基于双目视觉原理,根据球在同一时间内至少两个独立的摄像机上的位置,计算出球体的图像坐标及其在真实空间中的三维世界坐标,最终得到球体目标的运动轨迹。为了将球的运动轨迹准确地与比赛场地结合,系统借助高性能电脑,对比赛场地进行三维虚拟重建,将球的运动轨迹准确地与虚拟重建的比赛场地比较,来判断是否违反比赛规则。

具体工作流程如图 1 所示,如下:(1)赛前在比赛场地周围的不同位置设置多台高速摄像机并进行摄像机的标定;(2)对场地进行测量,对比赛场地进行虚拟重建。储存球场和比赛规则的相关数据;(3)对每个摄像机的每一帧画面中球体目标进行识别出与球的图像相对应的像素组。(4)使用来自至少两个不同摄像机的图像数据,为每一帧计算球的 3D 世界坐标。(5)根据连续帧中计算得出的 3D 世界坐标预测球的飞行路径。(6)将预测的飞行路径映射到虚拟重建的比赛场地上,以识别球与任何已经编入数据库的比赛区域特征的接触,来判断是否违反比赛规则。

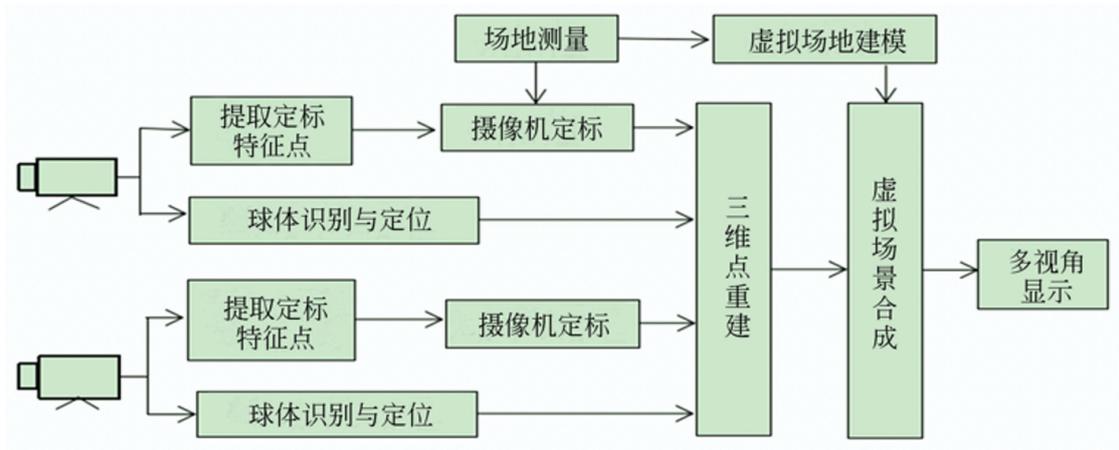


图 1: 鹰眼系统流程图[9]

双目视觉是基于视差（从有一定距离的两个点上观察同一个目标所产生的方向差异）原理，由多幅图像获取物体三维几何信息的方法，原理如图 2 所示[21]。

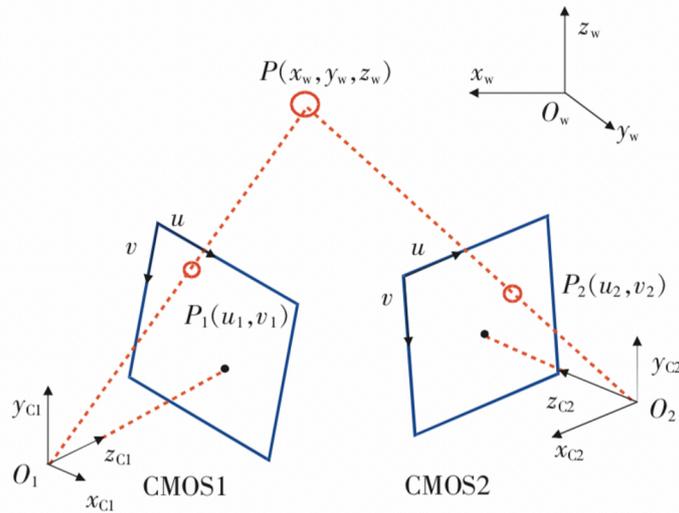


图 2: 双目视觉原理[21]

摄像机标定[22, 23]是指，在机器视觉中，为了确定物体的空间位置与物体在图像中的对应点的关系，首先要建立相机成像的几何模型，这些模型的参数就是相机的标定参数，而通过计算与实验来求解参数的过程叫做摄像机标定。摄像机标定可以有效去除由于相机本身带来的畸变，如图 3-a 所示，摄像机标定的原理如图 3-b 所示，摄像机标定的一遍流程如下：水平放置矫正用模板，从不同角度拍摄若干张模板图象，检测出图象中的特征点，求出摄像机的内参数和外参数，求出畸变系数。

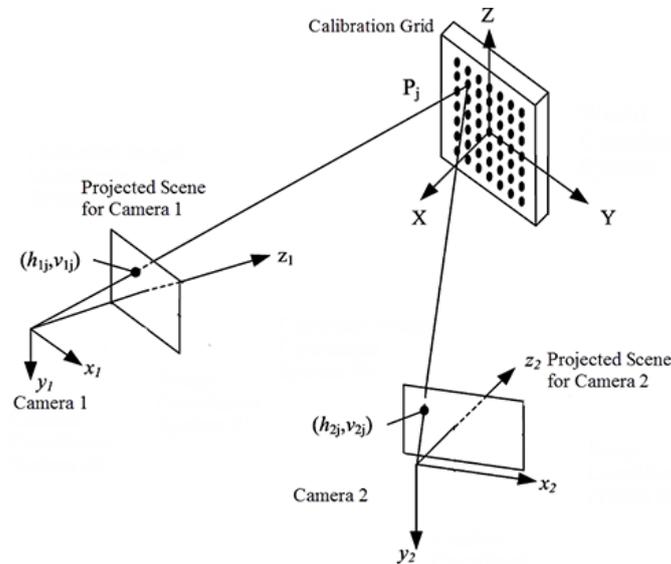
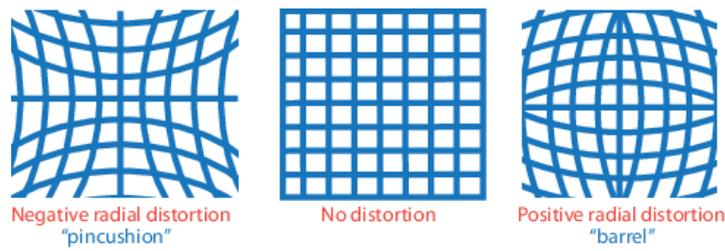


图 3: (a) 拍摄畸变[22]; (b) 摄像机标定原理[23]

1. 2. 3 基于单目视觉的体育球类跟踪及分析方法调研



图 4: TNet 效果示意图[2], 图中球桌上的球点是检测到的弹跳点

TNet[1, 2]是俄罗斯人工智能初创公司 OSAI 的提出的一种深度神经网络架

构, TNet 可以对普通单目摄像机的拍摄的乒乓球运动视频进行实时处理, 可以对视频中的球、运动员等进行定位及跟踪, 也可以检测时序事件, 例如: 发球、球弹起、球弹网等。图 4 是 TNet Demo 示意图 (Demo 的视频图可以在[2]下载)。

Myint 在文献[3]提出了一种在图像中通过自适应颜色阈值结合背景减除法的乒乓球定位方法; Deepball[4]实现了一种 CNN 网络用来在单目视频中跟踪比赛中的足球, 但足球的速度比乒乓球和网球速度要慢很多, 因此该方法不适合特别快速的球类检测。针对快速球类的定位和跟踪, Kotera 等人所在捷克研究团队给出了系列的研究结果[5-8], 并给出了开源的数据集, 通过结合图像模糊去除及图像抠图技术实现了 Deblatting 方法, Deblatting 可以在单目视频中有效的跟踪快速运动的球类等物体, 该团队在文献[7]也提出了一种利用动态规划找到全局能量最小化的方法来检测球的弹跳点。

1.3 本文工作

如上所述, 网球鹰眼系统在职业比赛中得到了成功的应用, 但目前也存在一些问题, 例如: 安装/维护复杂 (需要进行场地精确测量、摄像机定标); 成本高昂 (多台专业高速摄像机, 多摄像机时序同步) 等等, 限制了网球鹰眼系统更广泛的普及推广。我们受到 TNet, Myint, Kotera 等研究工作[1-8]的启发, 看到了采用单目视觉在运动物体检测和分析是具有一定可行性的, 因此计划开展本项研究工作。

本文的研究内容是: 探讨利用单目普通摄像机, 无需球场和摄像头标定, 采用弹跳点和网球场地位线相对位置判断的方法来实现网球出界判断。如果能验证成功, 可以有效的规避目前鹰眼系统高成本问题, 希望能够在业余网球比赛中也应用网球鹰眼技术。

本文的主要工作如下:

1) 设计并实现了一种基于单目视觉的网球出界判断的方法, 据我们最大知识能力所知, 公开的论文/专利等文献没有检索到**采用单目视觉实现网球鹰眼系统的工作, 我们的方法具有较好的创新性;**

2) 设计并实现了网球定位及弹跳点预测算法。针对网球定位中漏判/误判的问题, 我们设计一种结合背景减除法和颜色区域过滤法的二阶段网球定位方法; 针对弹跳点变化趋势不明显的问题, 我们设计了一种基于不确定点最小拟合损失的弹跳点预测方法;

3) 采集并标注了 349 段视频样本, 实现了核心算法以及原型系统, 包括网球轨迹定位, 弹跳点预测, 出界判断等。进行了实验验证, 分析讨论了实验结果, 并对摄像头的位置对准确率的影响等问题进行了分析。

2. 我们的方法

2.1 总体思路和流程

我们方法总体流程是：（1）定位视频中每帧图像的网球，并拟合网球的运动轨迹；（2）根据网球弹跳轨迹的特点，预测得到网球弹跳点；（3）比较弹跳点和预先定位的场地线的位置关系，判断弹跳点是否出界。

流程如图 5 所示，图 5 是我们程序运行后，把每个步骤结果可视化展示的效果，其中黄颜色的是定位的网球点轨迹，红颜色是两条拟合的曲线（分别对应球下降期和上升期），蓝颜色是两条曲线的交点即预测的弹跳点，把该弹跳点作为二维图像的一个点，根据弹跳点和网球场地线的二维关系判断是否出界。

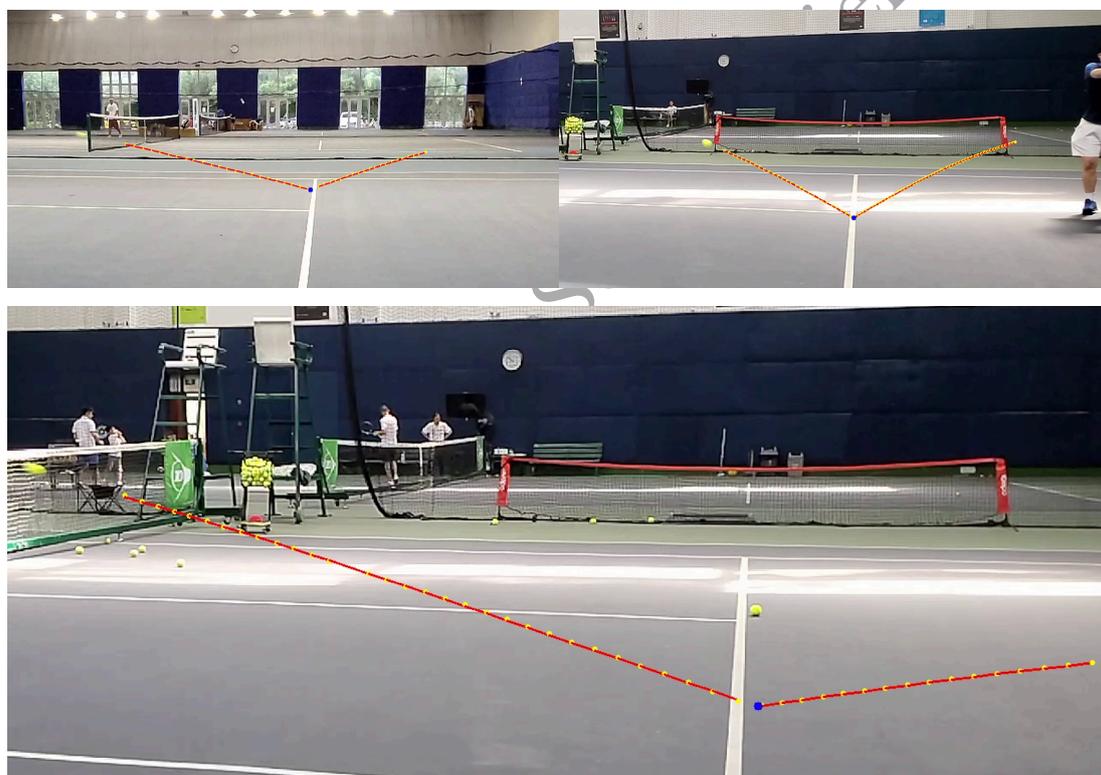


图 5：总体思路示意图

方法的具体流程如图 6 所示。和传统的双目视觉鹰眼系统的流程（图 1）比较，我们的方法减少了摄像机标定、三维坐标重建的工作，在判断是否出界时直接用二维坐标的相对关系进行判断。本章节的后续部分将重点介绍其中的网球定位方法和网球弹跳点预测方法。

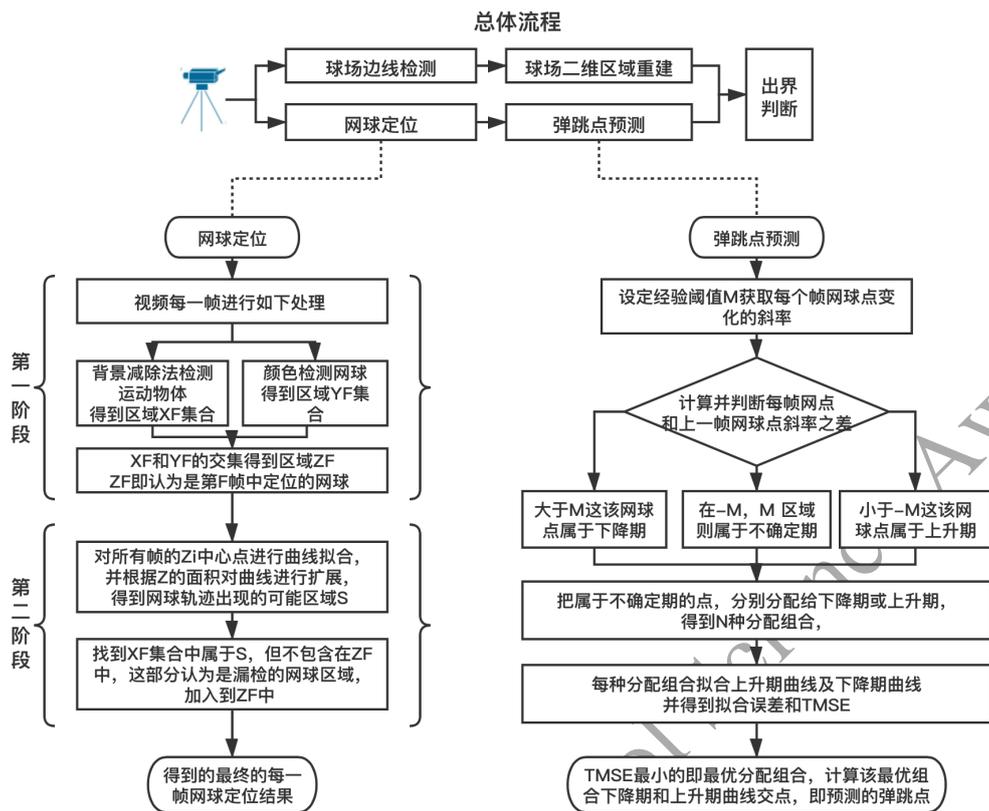


图 6: 基于单目视觉的网球出界判断系统流程

2.2 网球定位方法

2.2.1 相关研究工作

视频中的高速运动物体的检测常见的方法[15-19]有: 光流法 (optical flow) [17], 帧间差法 (frame difference) [18], 背景减除法 (background subtraction) [15, 16]。

光流法的原理和特点是: 图像中每一个像素点都有一个速度矢量, 当场景中的目标运动时, 对应图像中就会形成一个光流场。因此, 光流法方便利用像素强度 (亮度值) 在时间域的变化以及像素邻域的相关性确定像素的运动, 通过比较每个像素点在相邻帧之间的变化, 就能够判断出目标的位置, 从而找到视频序列中的运动信息。光流法能够较好处理基于运动的摄像头下的图像和视频。光流法不需要预先知道场景的任何信息, 就能够检测到运动对象, 可处理背景运动的情况, 但噪声、多光源、阴影和遮挡等因素会对光流场分布的计算结果造成严重影响; 而且光流法计算复杂, 很难实现实时处理。

帧间差法的原理和特点是: 帧间差法是一种无参数建模方法, 通过逐像素比较的方式来区分运动前景和背景。它选取时间上连续或相隔固定帧数的图像进行差分, 通过选取适当的阈值, 将差分图像中的像素分为运动前景和背景。当像素

值变化大于阈值时被看做运动前景，小于阈值时被看做背景。算法的不足在于对环境噪声较为敏感，阈值的选取相当关键，选择过低不足以抑制图像中的噪声，过高则忽略了图像中有用的变化。对于比较大的、颜色一致的运动目标，有可能在目标内部产生空洞，无法完整地提取运动目标。它仅仅适应于相机静止的情况。实际场景采集的视频中，目标的形状、大小、颜色都在时刻发生着变化，帧间差分法在应用时还存在许多局限，因此无参数建模的帧间差分法通常作为预处理步骤来使用。

背景减除法的原理和特点是：背景减除法基本思想是利用背景的参数模型来近似背景图像的像素值，将当前帧与背景图像进行差分比较实现对运动区域的检测，其中区别较大的像素区域被认为是运动区域，而区别较小的像素区域被认为是背景区域。背景减除法的背景图像必须是随着光照或外部环境的变化而实时更新的，因此该方法的关键是背景建模及其更新。针对如何建立对于不同场景的动态变化均具有自适应性的背景模型，减少动态场景变化对运动分割的影响，研究人员提出了许多背景建模算法，例如 MOG 高斯混合模型分离算法[15]，KNN 背景分离法[16]等。

2.2.2 我们的网球定位方法设计

我们发现，设计视频中网球定位方法存在如下挑战：(1)运动的网球目标小，运动速度快，容易导致漏检；(2)视频中存在干扰，不仅仅是网球在动，球员，隔壁球场网球也是运动物体，容易导致误检。

针对上述挑战，我们提出了一种结合背景减除法和颜色区域过滤法（简称颜色法）的二阶段网球定位方法，具体算法流程如图 6 的定位部分所示。我们设计该方法的思路是：

首先，经过对比测试，我们发现基于 KNN 的背景减除法对快运动的网球具有较好的检测效果，漏检率低，误减率也比较正常（例如：MOG 方法存在很多明显的误检）；

其次，经过观察，背景减除法检测到很多非网球的运动物体，例如：闪烁的灯光，跑动的球员等等，这些是由于存在其它运动物体的干扰。针对该问题，我们借鉴文献[3]的工作，并开源代码[20]的基础上进行了修改，采用颜色法对背景减除法的结果进行过滤，我们发现误判的情况得到了根本性的改善；

接下来的问题是，我们发现颜色法+背景减除法的结果存在比较多的漏判问题，这是由于颜色法很难发现特别小的网球的原因，即使背景减除法正确的检测到了这个网球，也会被颜色法过滤；

针对上述漏判问题，我们提出了一种两阶段定位的思路，第一阶段就是之前的颜色法+背景减除法的结果；第二阶段是指，根据第一阶段的定位结果，通过最小二乘法拟合一个网球运动轨迹区域 S ，然后把背景减除法结果中被颜色法过滤掉的，但又在 S 区域中的，补充到最后的定位结果中，在具体设计中，为了防

止误判，我们对候选区面积根据之前的结果做了限定；

通过上述两阶段定位方法，我们得到了误判率和漏判率都比较好的定位结果。

2.3 网球弹跳点预测方法

2.3.1 相关研究工作

基于双目视觉的鹰眼系统中，网球弹跳点预测主要通过三维坐标重建的方法实现；基于单目视觉的网球弹跳点的相关工作比较少。检测弹跳点是基于观察到球的弹跳是球运动轨迹突然的一种变化，设计算法检测这个突变来实现弹跳点检测，在第一章介绍过 TNet 把球的弹跳作为一种视频中事件（event），事件还包括发球、球擦网等，TNet 通过构建特定的时序深度学习网络来检测弹跳等事件（图 7 中的 d 部分即事件检测深度神经网络）。捷克研究人员在文献[7]中，他们提出了一种利用动态规划找到全局能量最小化的方法来检测运动轨迹突变，从而发现弹跳点的方法。

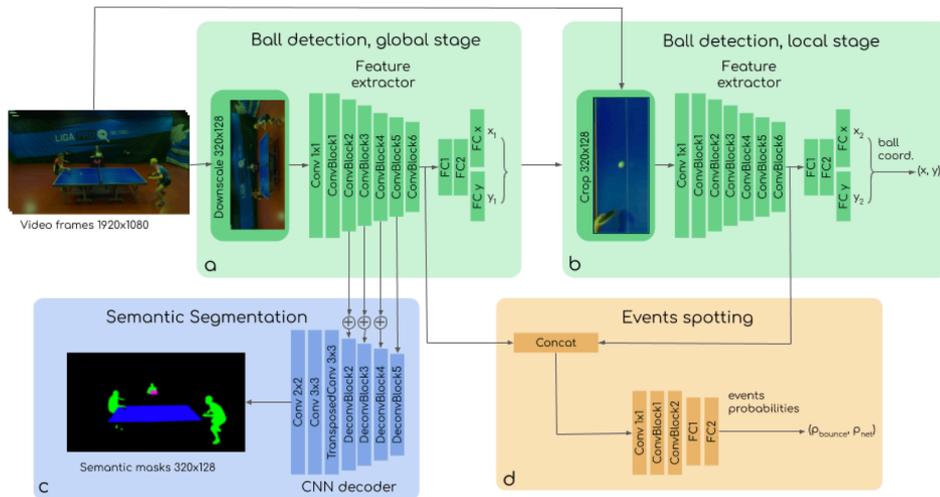


图 7: TNet 的整体深度神经网络架构[2]，其中 d 是弹跳检测模块

最小二乘法[29, 30]是一种数学优化技术，通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。利用最小二乘法可以使得这些求得的数据与实际数据之间误差（如下公式所示）的平方和为最小。图 8 是通过最小二乘法做直线及曲线拟合的示意图[29]。

$$loss = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - [a_0 + a_1(x_i) + a_2(x_i)^2 + \dots + a_n(x_i)^n])^2$$

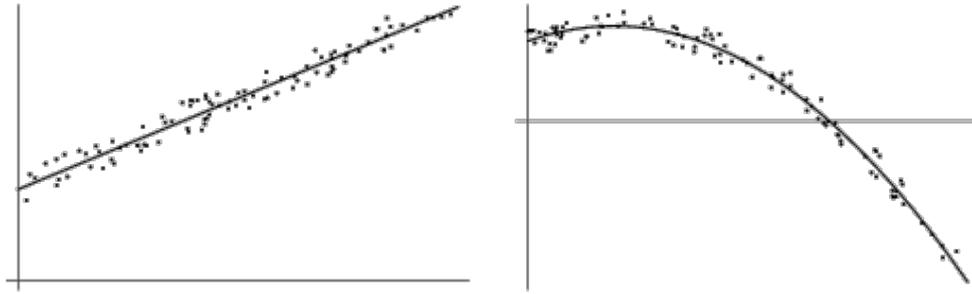


图 8: 最小二乘法做直线及曲线拟合的示意图[29, 30]

2.3.2 我们的网球弹跳点预测方法设计

网球弹跳点预测的挑战在于: 如上所述, 球的弹跳是球运动轨迹的一种突变, 部分运动轨迹上的球点, 我们的确比较容易区分为弹跳前的下降期或弹跳后上升期, 但是也有部分球点, 特别是在弹跳点前后的球点, 由于网球速度、旋转、拍摄角度的变化, 球的弹跳很多不是“突然”的变化, 这样导致了这些球点很难区分是下降期还是上升期, 容易造成了预测的误差。

我们提出了一种基于不确定点最小拟合损失的弹跳点预测方法, 该方法的流程如图 6 的弹跳点检测部分所示。该方法的总体思路如下: 我们目标是把球运动轨迹分为下降期和上升期两类, 通过用最小二乘法分别拟合下降期和上升期两条曲线, 两条曲线的焦点即预测的弹跳点。针对部分球点难以区分的难点, 我们的思路是把这些难区分的球点归为不确定性点 (如图 9a 中最下面的 3 个点即不确定点), 然后把这些不确定性点依次放到下降期或上升期, 得到多种组合, 然后用最小二乘法拟合曲线, 找到拟合误差 MSE 最小的那种组合, 该组合的下降期和上升期拟合曲线的交点即我们预测的弹跳点。我们参考了 github 的最小二乘法拟合曲线的代码[28]来实现我们的工作。图 9 是我们算法拟合结果图, 图 9a 中靠近落地点的即不确定性点, 图 9b 是最优拟合误差的结果。

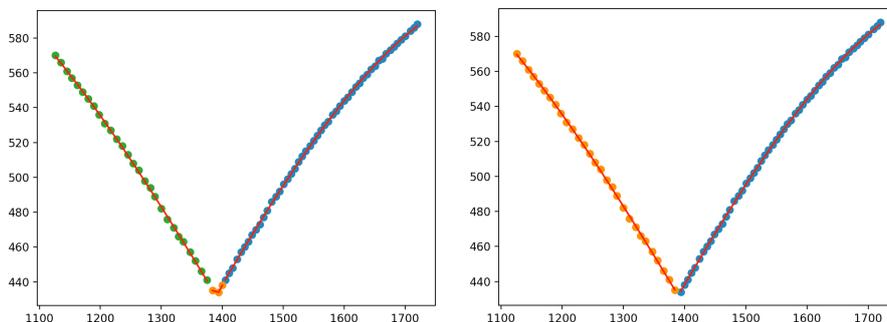


图 9: (a) 包括不确定性点的拟合结果; (b) 最优拟合误差结果

3. 实验

3.1 实验说明

3.1.1 数据集说明

- **样本数量**: 349 段视频, 其中易混淆视频 11 段, 图 10 是数据集示例。
- **标注内容**: 人工每段视频标注是否出界, 每段视频的发球线及底线
此外, 由于论文进度时间原因, 本次实验没有实现场地线检测算法, 我们采用人工标注的方式标注了发球线及底线。
- **摄像设备及帧率**: 三星 S10 手机慢动作拍摄 (帧率: 240 帧每秒)
摄像机的帧率是有限的, 而网球的速度在球类运动中特别快, 职业运动员的发球时速可以很容易超过 200 公里, 业余球员 150 公里时速也是很常见, 以 150 公里时速计算, 如果期望每帧能捕捉到 10 毫米的变动, 摄像机帧率需要达到 4167 帧, 这种超高速摄像机的成本非常昂贵, 而低帧率的运动轨迹预测误差会比较大。相机帧率越高对预测越有帮助, 但 800 帧及更高帧率的相机特别昂贵, 基于上述考虑, 我们本次项目选用三星 S10 作为视频采集设备。
- **拍摄方式及角度**: 固定拍摄, 针对发球线及底线出界拍摄
其它拍摄角度样本, 例如: 边线出界判断, 其原理类似, 由于论文进度时间原因本次没有拍摄。
- **其它说明**: 根据经验预计, 本次采集视频的网球速度不超过 150 公里时速。

3.1.2 评测方法

实验评测得到样本下出界判断的准确率,

准确率的计算公式是: 判断是否出界正确的样本/总样本。

其中判断是否出界的方法是根据预测的弹跳点和标注的发球线/底线的关系计算得到。

3.1.3 主要代码说明 (已经在 github 开源) [31]

- detect_all_in_video.py
 - detect_motion_in_one_frame_by_BackgroundSubtractor () : 背景减除法定位运动物体
 - detect_ball_in_one_frame_by_aspectratio () : 颜色区域法定位网球
 - get_phase1_from_motion_and_ball () : 颜色区域法+背景减除法定位网球
 - detect_ball_phase2 () : 网球定位第二阶段
- lib_tennis.py
 - fit_curve () 用最小二乘法拟合一条曲线

- `split_to_3_parts()`：把检测到的所有网球轨迹点分为上升期、下降期以及不确定性点三部分
- `find_best_two_curve()`：把不确定性分别分配到上升期和下降期，根据拟合的最小损失找到最佳的上升且和下降期点
- `get_the_bounce_point()`：根据上升期和下降期曲线拟合，找到弹跳点

3.2 实验结果及讨论

3.2.1 实验结果

准确率：99.5%，易混淆的准确率：81.8%。

其中一个错误图 10，主要原因是有多干扰且远端边线的原因。

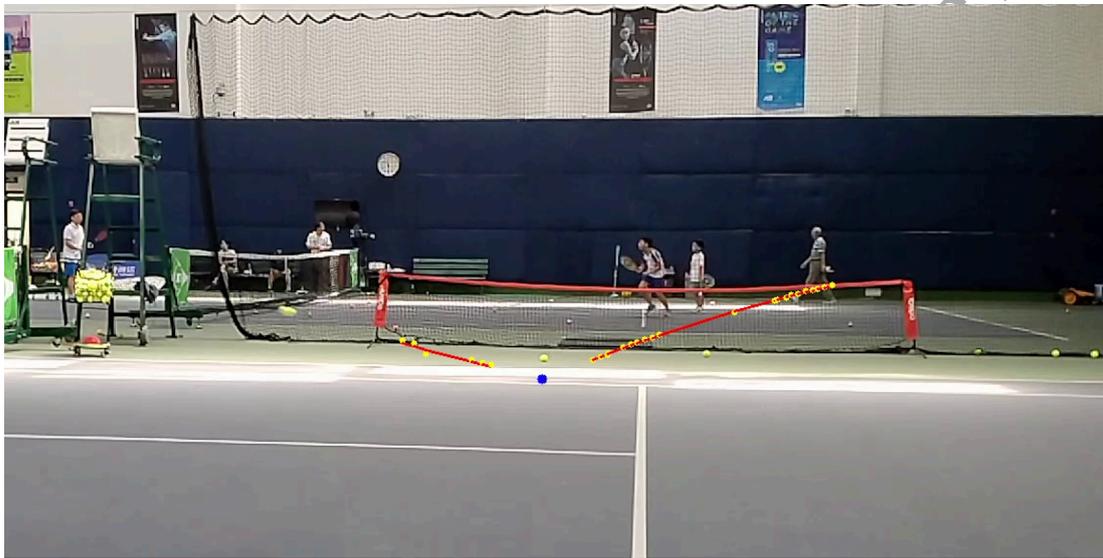
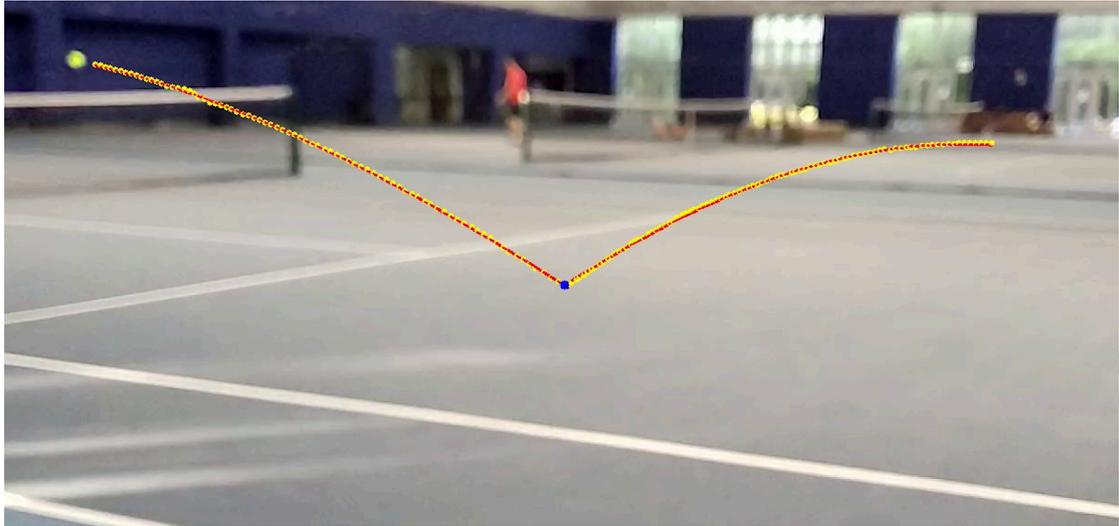


图 10 远端线，干扰多

3.2.3 摄像机位置对准确率影响

图 11 中列举了多个图像，从 a 图像相对容易判断，但其它即使是人反复观看视频也难以判断。分析其原因，我们认为由于单目视觉方法不进行三维坐标重建，而是依赖相对位置关系判断，摄像机位置不同会造成视觉偏差，因此会导致准确率也会降低。一般来说，我们认为要布置 4 个摄像头，场地每边布置 2 个，一个是在发球线和底线平行线中间，一个是在边线中间，可能会比较合适，具体后续需要进行测试及验证。



(a) 容易判断



(b) 摄像头太远，角度不对，难以判断 (c) 远端边线；

图 11: 摄像机位置对判断的影响

2020 S.-T. Yau High School

4. 结论及展望

4.1 结论

为解决目前鹰眼系统高成本、安装维护复杂等问题，我们设计了一种基于单目视觉的网球出界判断方法，该方法首先通过定位分析视频中网球运动轨迹，然后预测网球的弹跳点，最后根据二维图像中的弹跳点坐标和网球场场地的相对关系判断网球是否出界。具体的针对网球定位中漏判/误判的问题，我们设计一种结合背景减除法和颜色区域过滤法的二阶段网球定位方法；针对弹跳点变化趋势不明显的问题，我们设计了一种基于不确定点最小拟合损失的弹跳点预测方法。

为了验证我们的方法，我们收集并标注了 349 段视频样本，实现了核心模块算法，包括网球轨迹定位，弹跳点预测等；实验表明，准确率达到 99.5%，易混淆的样本准确率达到 81.8%，初步验证了我们方法的可行性。

据我们最大知识能力所知，公开的论文/专利等文献没有检索到**采用单目视觉实现网球鹰眼系统的尝试**。我们的工作具有较好的创新性，我们已经把本文的工作**申请了专利**，专利名称：一种自动判断网球出界的方法及系统(专利申请号：202010932317.4)。本论文的附件包括该专利的《专利申请书》以及《国家知识产权局专利受理通知书》。

我们在 [github](#) 上[31]公开了本次研究工作的所有标注样本和实验代码。

4.2 展望

我们的最终目标实现鹰眼系统在业余比赛的方便/低成本使用，要达到这个目标，本文还存在不足及很多后续需要完成的工作：

本次项目的时间特别紧，报告还存在很多不足。首先，本次采用的总体样本量比较少，并且易混淆的样本量更少，后续计划加大样本的采集工作，并且计划标注落地点坐标，以及落地点和场地线的绝对位置，从而更精确的验证算法误差和准确率；本文采集和测试的样本是针对底线出界角度拍摄的，后续还需要采集边线测试样本。

我们没有实现场地线检测模块，我们是人工标注了场地线用于本文的实验，后续计划把场地线检测功能加上，我们已经用 LSD[25]和 FLD[24]算法进行线段检测等进行了部分实验；在定位/落地点检测算法方面，我们后续也会尝试用 TNet 等深度学习模型进行对比及改进；

到真正应用还有很多工作要做，例如：高速样本的采集和测试（时速 200 公里），可视化回放，操作界面设计；选择价格合理的摄像头和图像处理用计算机；摄像机如何摆放，如何适应不同网球场类型（红土/草地）等等。我们计划会一直把这个项目做下去，实现真正在网球场使用的目标。

5. 参考文献

- [1]. Roman Voeikov, Nikolay Falaleev, Ruslan Baikulov. TNet: Real-time temporal and spatial video analysis of table tennis, CVPR Workshop, 2020.
- [2]. <https://github.com/maudzung/TNet-Real-time-Analysis-System-for-Table-Tennis-Pytorch>
- [3]. Hnin Myint, Patrick Wong, Laurence Dooley, and Adrian Hopgood. Tracking a table tennis ball for umpiring purposes. In Fourteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA2015), May 2015.
- [4]. Jacek Komorowski, Grzegorz Kurzejamski, and Grzegorz Sarwas. Deepball: Deep neural-network ball detector. CoRR, abs/1902.07304, 2019.
- [5]. <http://cmp.felk.cvut.cz/fmo/>
- [6]. https://github.com/rozumden/deblatting_python
- [7]. Rozumnyi D, Kotera J, Sroubek F, et al. Non-causal Tracking by Deblatting. german conference on pattern recognition, 2019: 122-135.
- [8]. Kotera J, Rozumnyi D, Sroubek F, et al. Intra-frame Object Tracking by Deblatting. arXiv: Computer Vision and Pattern Recognition, 2019.
- [9]. 刘剑秋,付萍,李涛.网球“鹰眼”系统原理初探.广播与电视技术,2012,39(10):69-73.
- [10]. 周瑾,孟祥印,叶美松.基于计算机视觉和 LabVIEW 平台的网球鹰眼系统.传感器与微系统,2018,37(07):102-104+107.
- [11]. 马冲聪. 鹰眼回放系统中的关键技术研究.西安理工大学,2014.
- [12]. <https://www.hawkeyeinnovations.com>
- [13]. <https://www.playsight.com>
- [14]. <http://inout.tennis>
- [15]. Z. Zivkovic, "Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction," Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.
- [16]. Zivkovic Z, Der Heijden F V. Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(7): 773-780.
- [17]. Bruhn A, Weickert J, Schnorr C, et al. Lucas/Kanade meets Horn/Schunck: combining local and global optic flow methods. International Journal of Computer Vision, 2005, 61(3): 211-231.
- [18]. Yin H, Chai Y, Yang S X, et al. Fast-moving target tracking based on mean shift and frame-difference methods. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(4): 587-592.
- [19]. 王慧.运动目标检测和跟踪算法综述.电脑知识与技术,2018,14(24):194-197.
- [20]. https://github.com/aditirao7/tennis_ball_detection
- [21]. 郭继平,李阿蒙,于冀平,等. 双目立体视觉动态角度测量方法[J]. 中国测试, 2015 (7): 21-23 36
- [22]. Camera Calibrator [EB/OL]. What Is Camera Calibration? - MATLAB & Simulink, [2020-09-13]. <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- [23]. SOURISH GHOSH, . Stereo calibration using C and OpenCV [EB/OL]. Sourish Ghosh, [2020-09-13]. <https://sourishghosh.com/2016/stereo-calibration-cpp-opencv/>.

- [24]. Lee, Jin Han, et al. "Outdoor place recognition in urban environments using straight lines." 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014.
- [25]. Von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: a line segment detector[J]. Image Processing On Line, 2012, 2: 35-55.
- [26]. N. Owens, C. Harris and C. Stennett, "Hawk-eye tennis system," 2003 International Conference on Visual Information Engineering VIE 2003, Guildford, UK, 2003, pp. 182-185, doi: 10.1049/cp:20030517.
- [27]. Shlyak Y, Komarov V. Method and system for real time judging boundary lines on tennis court: U.S. Patent 8,199,199[P]. 2012-6-12.
- [28]. <https://github.com/lmfit/lmfit-py>
- [29]. Least Squares Regression, [2020-09-13].<https://www.mathsisfun.com/data/least-squares-regression.html>.
- [30]. 最小二乘法—多项式拟合非线性函数, [2020-09-13].
<https://www.jianshu.com/p/af0a4f71c05a>
- [31]. <https://github.com/JoeyChennn/TennisPoint>

2020 S.-T. Yau High School Science Award

6. 致谢

我是一个体育迷，喜欢各种体育活动，其中网球是我投入时间最多的项目，从 2016 年开始接受网球专业训练，是网球国家二级运动员，参加过许多正式比赛，自己平常也经常观看职业比赛，比赛中的鹰眼裁判系统感觉很酷，经常会想到如果能在自己的网球比赛也用到这项技术就好了。

今年上半年，由于疫情无法到学校上课，利用空闲时间从 2 月份开始系统学习机器学习、计算机视觉方面的知识，4 月份左右开始，父母鼓励我自己实现一个鹰眼系统，从 6 月 15 日到上海交通大学严骏驰老师实验室实习，开始计划实现一个鹰眼系统。查阅了资料后，刚开始是想着用双目视觉来做的，并且都已经买好了一个 Indemind 双目摄像头做实验。在通过观察网球运动轨迹时，发现很多时候并不需要通过 3D 重建也是可以判断是否出界的，再加上高帧率的双目摄像头价格贵，还需要各种摄像机标定等复杂的安装过程，因此就想到能否用单目视觉实现出界判断。通过阅读 TNet [2] 等文献，和老师一起分析后，觉得单目视觉的方案具有一定可行性，值得尝试去做一下。从 7 月初开始到现在，通过系统设计、样本采集、代码实现、实验结果初步验证了我们的思路，我们还根据本次工作，在上海恒慧知识产权事务所的徐红银老师帮助下，完成了一篇专利的申请。

我首先是要感谢严骏驰老师对我的帮助与指点，为我提供了许多文献调研、系统设计、论文撰写方面的建议，令我受益匪浅。感谢黄征老师在弹跳点预测算法中给我的启发。特别要感谢我的父母，他们在繁忙的初创企业工作的同时，一直在整体流程、代码实现、专利申请上等方面给我启发和帮助。

我还要感谢与在交大实验室实习的其他同学，袁瑛、徐右轩的调研报告给了我许多的启发，感谢李劲文对样本处理的帮助。特别要感谢蔡少波同学，他是交大网球校队的队长，是 2019 年全国大学生网球团体亚军的主力队员。蔡少波学长不仅在网球训练对我很大帮助，在这次的项目中他与我一同去制作并采集了样本（他在样本视频中出现过很多次😊），同时在专利撰写方面也出了很多很好的意见，他也是完成的专利合作发明人。

感谢上海点赞网球俱乐部、上海交通大学网球队为我们的实验提供场地帮助。感谢开源社区，自己的部分代码就是依赖开源社区代码实现的，本次工作的代码也已经开源。

目前完成的工作距离实用还有很多事情要做，还有很多技术难点要解决，我们得到了很多老师、教练、朋友的鼓励，谢谢大家的支持，我们已经计划组一个团队继续我们工作，刚刚为我们的鹰眼系统取名叫：**TennisPoint**，希望不断积累完善，在不久的将来实现网球场上使用 TennisPoint 的梦想！