

基于非线性滤波器的多人及多角度的人眼检测和跟踪

余涛^{1*}, 邹建华^{2,3}, 徐君¹, 龙卓群¹

¹西安航空学院电子工程学院 陕西西安

²西安交通大学系统工程研究所, 系统工程国家重点实验室 陕西西安

³广东西安交通大学研究院 广东顺德

【摘要】本文基于非线性滤波提出一种针对多人及多角度人眼的检测和跟踪方法。首先用五种分别具有四个不同尺度的 AdaBoost 人脸检测器依次在图像中每个区域检测人脸; 然后用四种 AdaBoost 人眼检测器锁定眼部位置; 若眼睛检测失败, 则应用解剖学中器官位置的先验比例模板法作为补充; 接着用非线性滤波器 Unscented filter 预测目标下一位置; 最后用上述检测方法检测后续帧, 修正相关预测; 如此重复上述循环直至跟踪结束。相关测试得出该方法对多人及多角度的垂直主体的眨眼, 闭眼, 戴眼镜及部分遮挡等均具有一定程度鲁棒性, 并且非线性滤波使其能够以变化速度的曲线方式跟踪目标。

【关键词】多人; 多角度; 人眼检测; 跟踪; 非线性滤波; 检测器; 目标; 特征

【基金项目】广东省佛山市重点领域科技攻关项目, 编号: 2020001006827

【收稿日期】2023 年 7 月 11 日 **【出刊日期】**2023 年 8 月 21 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20230024

Multi-user and Multi-view human eyes' detection and tracking

Tao Yu^{1*}, Jianhua Zou^{2,3}, Jun Xu¹, Zhuoqun Long¹

¹School of Electronic Engineering, Xi 'an Aeronautical University, Xi 'an, Shaanxi

²State key laboratory of systems engineering, Systems Engineering Institute, Xi 'an JiaoTong University, Xi 'an, Shaanxi

³Research Institute of Xi 'an Jiaotong University, Shunde, Guangdong

【Abstract】This paper presents a framework on multi-user and multi-view human eyes' detection and tracking. First, it uses five kinds of AdaBoost face detectors with four different sizes at each area of image to detect faces in turn. Then, to locate eyes' positions, four kinds of AdaBoost eye detectors are used and if the eye-detection above fails, the prior knowledge of human organs' positions in anatomy is applied as a spare method. Next, it uses the unscented filter to predict the targets' next possible positions. Finally, the detection method above is used to detect the third frame and amend the relative forecasting. And repeat above cycle until tracking over. This framework is robust to subject's eyes' blinking, closing, wearing glasses and partly sheltering in multi-face and multi-view to a certain extent for the optimized structure performance and reasonable selected features. And because of the nonlinear filtering, it can track targets in curves with changing speeds. It mainly fits most usual vertical head scenes in monitoring environment.

【Keywords】Multi-user; Multi-view; Eyes' detection; Tracking; Unscented filter; Detector; Target; Feature

近年来, 眼睛的检测跟踪已成为一个重要研究方向。它可以应用在很多领域中, 如: 模式识别^[1], 驾驶提醒^[2], 医疗诊断^[3], 残疾人自助式服务^[4], 人机交互 (HCI) ^[5], 多用户的三维显示等等^[6]。

*通讯作者简介: 余涛 (1974-) 男, 汉族, 陕西西安, 西安航空学院电子工程学院教师、博士, 主要研究方向: 计算机视觉, 模式识别, 人工智能, 智能控制等。联系邮箱: yvt9399@stu.xjtu.edu.cn

作者简介: 邹建华 (1964-), 西安交通大学自动化科学与工程学院兼广东顺德西安交通大学研究院院长、教授、博导, 主要研究方向: 图像处理与分析、智能网络控制系统、多媒体认知与知识发现等。徐君 (1979-), 西安航空学院电子工程学院教授, 主要研究方向: 成像光谱技术, 遥感影像处理等。龙卓群 (1971-), 西安航空学院电子工程学院副教授, 主要研究方向: 移动机器人, 图像, 路径规划研究等。

当前, 眼睛的检测和跟踪方法分为两类: 一类是被动眼睛检测^[7,8], 该类方法直接分析在自然光照下捕获的相关图像, 通过一定的软件来完成, 并且不需要任何光学硬件; 另一类方法是主动眼睛检测, 该方法基于主动的红外 (IR) 光照, 有助于确定人眼瞳孔的位置, 并且同时需要相关软件和硬件的支持^[9,10]。尽管通常第二类方法相对第一类方法, 对各种光照更鲁棒并且随着检测一开始就有着较快的处理速度, 但它需要附加的硬件支持并且在户外环境中仍然存在较多的错误检测, 这就使得第二类方法的应用范围比第一类方法更有限。所以本文这里试图针对第一类方法提高其鲁棒性和处理速度。

本文提出了一个对多人及多角度的人眼进行检测和跟踪的方法。尽管该方法属于该领域的被动类方法, 但是该方法通过合理的特征选择, 优化的结构和基于非线性系统的跟踪, 能够对多人及多角度个体眼睛的眨眼, 闭合, 佩戴眼镜及以一些多样的曲线运动都具有一定程度的鲁棒性。

1 基本原理

图 1 给出本文方法框架, 该方法主要通过依次进行检测人脸, 检测眼睛, 锁定眼部位置及预测眼部的下一个位置, 并且每一个阶段都是通过相关有效的标志切换到另一个阶段的。重复该循环即实现对多个人脸及多个角度的场景下眼部位置的跟踪。

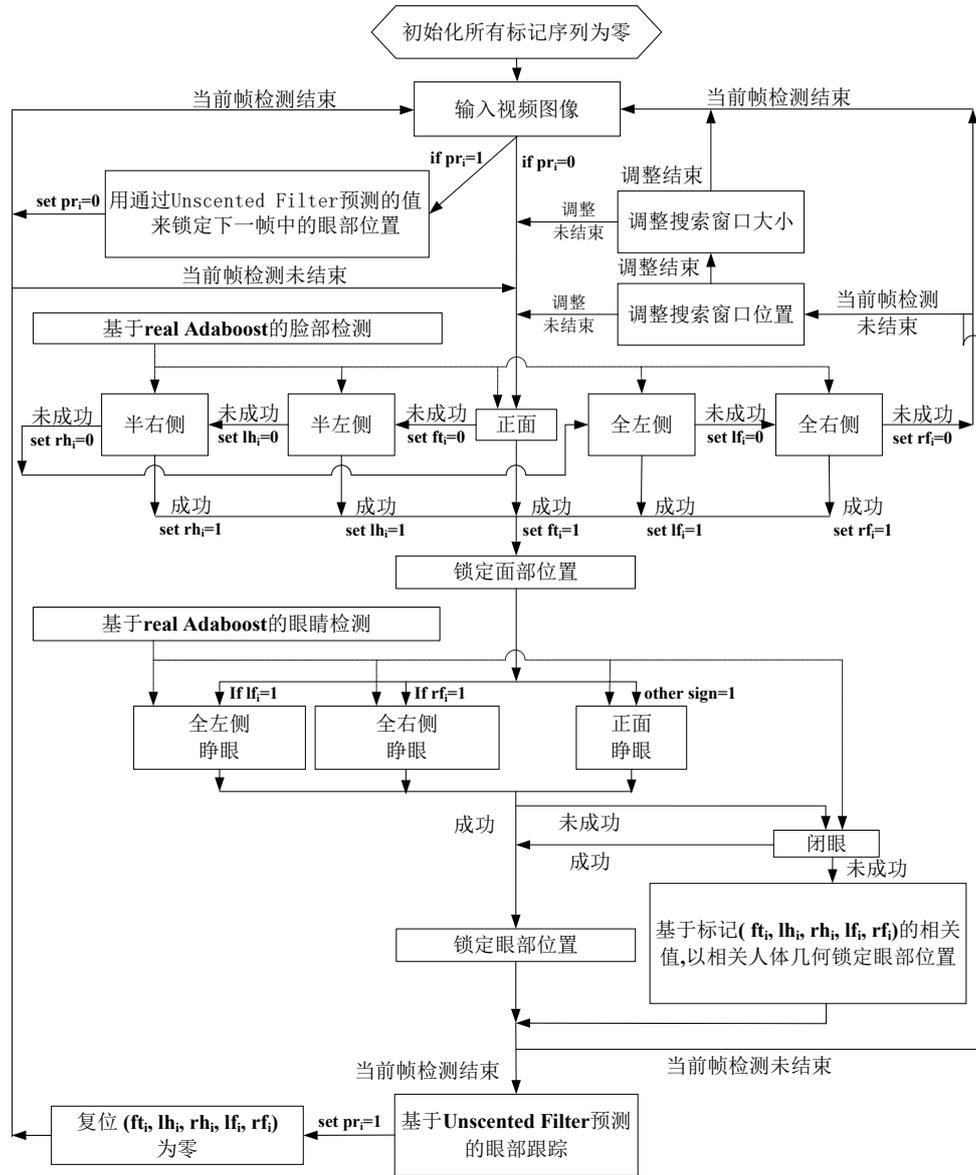


图 1 本文的方法

当前多数检测器利用 AdaBoost 方法^[11,12]。作为一种提升算法, AdaBoost 方法能够适应性地调整训练样本的权重, 并选择最好的弱分类器, 然后以不同的弱分类器分别投票的方式来集成它们, 成为一个强分类器。在这类算法中, Real AdaBoost^[13]因为具有连续的置信水平, 所以它能够描述分类边界比 Discrete AdaBoost^[14]更准确。因此这里选择 Real AdaBoost 作为面部和眼部的检测方法。特别是为了更有效地抵制过学习, 参考文献[9], 这里的滑动系数 ϵ 不是预先确定的固定值, 并且它会按照正样本权重与负样本权重的比率而变化。另外, AdaBoost 方法作为一个基于特征的方法, 通常用便于计算的 Haar 特征, 并且每一个 Haar 特征被用来训练一个弱分类器。本文中在样本图像被灰度化后, 用于面部检测和眼部检测的相关级联都是用相关的 Haar 特征被训练出。

2 各环节相关处理及分析

2.1 面部特征的训练和检测

参考文献[15], 并结合本文的目标, 图 2 给出了本文用于训练面部检测器包括正面脸部和侧面脸部的 Haar 特征。

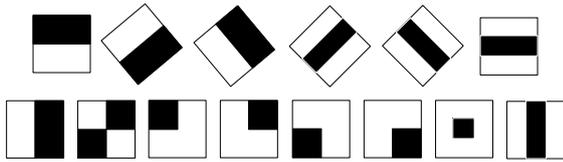


图 2 用于训练面部检测器的 Haar 特征

根据人的头部相对平面旋转出的相关角度, 通常多角度面部被分为五类: 全左侧, 半左侧, 正面, 半右侧和全右侧, 分别覆盖 $[-90^\circ, -50^\circ]$, $[-50^\circ, -20^\circ]$, $[-20^\circ, +20^\circ]$, $[+20^\circ, +50^\circ]$, $[+50^\circ, 90^\circ]$ 。这里, 每一类也包括 $[-15^\circ, +15^\circ]$ 在平面中的旋转和 $[-20^\circ, +20^\circ]$ 向上向下的变化。由于面部的对称性, 所以只有正面, 半左侧和全左侧检测器被训练出。一些典型的图像如图 3 所示。半右侧和全右侧检测器可以通过相关左侧检测器的镜像方式获得。在检测过程中, 由于在实际监控场景中, 碰到的多数面部的角度是正面, 其次是半左侧或半右侧, 最少的是全左侧或全右侧, 所以这里对图像的每个区域, 基本上都是按照这个顺序检测人脸。并且为了能够发现图像中各种不同尺度的人脸, 不同于文献[9], 这里对上述每一类人脸预定义了四个面部尺度大

小, 并且对图像的每个区域, 首先以每一类的最大尺度检测脸部, 然后以较小的尺度继续检测人脸, 直至最小尺度。在这个过程中, 若图像某个区域中, 某个类别的某个大小的面部被检测出时, 这个面部区域将被标记, 以避免该区域被再用于其他尺度面部检测。这样, 此面部检测方法的时间复杂度就极大程度地降低了。

2.2 眼部特征的训练和检测

考虑到实际中不同表情和视角下人眼的各种各样的特征, 这里基于图 2 增加了一些额外的 Haar 特征, 如图 4 所示, 用于检测眼部。在训练眼部检测器的过程中, 根据在许多通常视角下人眼特征的变化程度, 本文中用了四种眼部级联方式, 分别对应全左侧睁眼, 全右侧睁眼, 正面睁眼和闭眼, 来训练四个眼部检测器。图 5 显示了一些典型的眼部图像。能够看出: 第一行拥有特别的特征, 属于全左侧睁眼; 严格意义上讲, 第三行中的一些图像在视角上不同于第二行, 但这两行都共有许多相似的特征, 所以这里把它们都归属于睁眼; 第四行的特征在一些不同的视觉下也是相似的, 归属于闭眼。所有上述图像, 包括图 3, 在被作为样本训练相关检测器之前, 会被切割成同等大小。并且与训练脸部检测器类似, 全右侧睁眼检测器是通过全左侧睁眼检测器的镜像获得的。由于眼部的位置是在相关的脸部区域内, 所以这里为提高搜索速度, 眼部检测只有在图像的某个区域中某类脸部检测成功的时候开始, 并且眼部检测只在面部区域中进行。

2.3 眼部位置的锁定

通常在每次相关面部检测成功时眼部检测不能确定总是成功的, 所以这个阶段被分为两种处理手段。当眼部检测成功时, 在检测器与相关区域间的匹配中心就是相关的眼部位置, 并且以该上述匹配中心为中心, 标记小圆圈作为被检测出的眼部区域。当眼部检测不成功时, 相比上述检测器, 作为一种粗略的估计手段, 这里采用一种固定的模板匹配方法, 结合解剖学中人体该器官位置的相关先验知识, 按照一定的比例, 来锁定眼部位置^[16]。图 6 中, 根据从之前面部检测阶段获得的标记序列中的相关有效标记, 相关类型的眼部匹配被执行来锁定可能的眼部区域。这种处理手段也能在一定程度上补偿遮挡的情况特别是当被检测的目标的眼部在某时刻被部分屏蔽时。

2.4 非线性滤波跟踪

现实中大多数系统是非线性系统, 所以基于非线性系统的滤波比基于线性系统的滤波更鲁棒。在跟踪领域中, 与卡尔曼滤波器相比, Unscented 滤波器^[7]能够通过应用从 unscented 转换中获得的的状态变量, 实现对非线性系统的状态估计。所以本文

应用 Unscented 滤波器用于跟踪阶段。

这里每一个被检测的眼睛被当做一个目标, 用 unscented 滤波器来跟踪。假设被检测的目标的速度在某时刻 t 是 $v(t)$, 现实中大多数目标的运动可以被描述为图 7 中的一个旋转模型, 其中 a_t 是切方向加速度, a_n 是法方向加速度。



图 3 用于训练相关检测器的一些典型的面部图像

注: 第一行是正面人脸, 第二行是半左侧人脸, 第三行是全左侧人脸

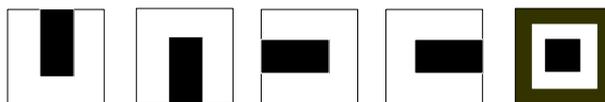


图 4 增设的用于检测眼部的 Haar 特征



图 5 一些典型的眼睛图像

注: 第一行是全左侧睁眼; 第二行和第三行是正面睁眼; 第四行是闭眼

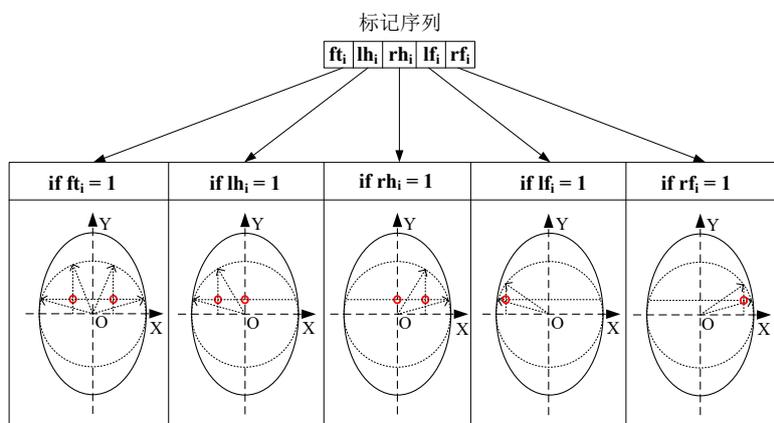
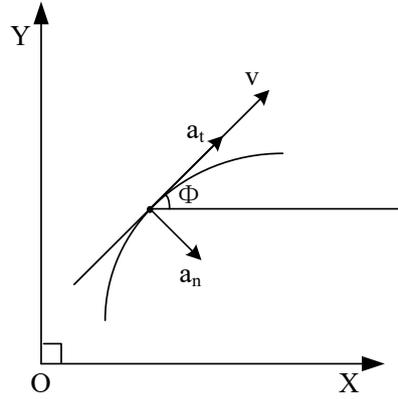


图 6 基于标记序列中相关有效标记的模板匹配

图 7 在某时刻 t 运动目标的状态

这样, 被检测的目标的运动状态向量可假设如下:

$$X(k) = [x_{ms}(k), v_x(k), y_{ms}(k), v_y(k), \omega]^T \quad (1)$$

其中: $x_{ms}(k)$ 和 $y_{ms}(k)$ 分别是目标的横坐标和纵坐标; $v_x(k)$ 和 $v_y(k)$ 分别是目标在 X 轴和 Y 轴方向的速度; ω 是目标的转弯角速度。

测量矩阵是 $Y(k)$:

$$Y(k) = [x_{me}(k), y_{me}(k)]^T \quad (2)$$

其中 $x_{me}(k)$ 和 $y_{me}(k)$ 分别是目标的测量横坐标和测量纵坐标。

$$X(k+1) = A(k)X(k) + B(k)W(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} & 0 & \frac{1 - \cos(\omega_k T)}{\omega_k} & 0 \\ 0 & \cos(\omega_k T) & 0 & -\sin(\omega_k T) & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos(\omega_k T)}{\omega_k} & 1 & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} & 0 \\ 0 & \sin(\omega_k T) & 0 & \cos(\omega_k T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-T/\tau_\omega} \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} W(k) \quad (5)$$

其中 T 是一个图像序列中相邻图像间的时间间隔; τ_ω 是 ω 的时间相关常数。

(2) 测量向量模型:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} X(k) + M(k) \quad (6)$$

对于转弯角速度 ω 的计算---根据在视频的附近帧中跟踪的目标的横坐标与纵坐标的相对位置的变化, 可以得到速度 $v(k)$ 。那么根据速度的变化

状态转移过程噪声向量是 $W(k)$, 服从 $p(w) \sim N(0, \sigma_w^2)$ 的正态分布, 其中 σ_w^2 是协方差。

$$W(k) = [w_x(k), w_y(k), w_\omega(k)]^T \quad (3)$$

测量的噪声向量是 $M(k)$, 服从 $p(m) \sim N(0, \sigma_m^2)$ 的正态分布, 其中 σ_m^2 是协方差。

$$M(k) = [m_x(k), m_y(k)]^T \quad (4)$$

另外, $W(k)$ 和 $M(k)$ 是彼此不相关的。这样, 该 unscented 滤波器包含两个模型:

(1) 运动状态向量模型:

及向量的分解, 可以得到法向方向的相关加速度 $a_n(k)$ 。最后应用 $v(k)$ 和 $a_n(k)$ 能够获得转弯角速度 ω_k :

$$\omega_k = a_n(k) / v(k) \quad (7)$$

另外, 为提高跟踪速度, 这里考虑到人脸的移动速度在一个有限时间范围内是不太快的, 所以应用 Unscented 滤波器^[7], 在给定当前的状态下预测视频图像的下一个帧的眼睛的运动状态。同时检测

阶段跳过下一帧的后续帧, 即在下下一帧中进行, 充当下一个状态为 Unscented 滤波器修正。这样重复上述形式就实现了对运动的人眼的实时跟踪。

3 实验测试方案及结果分析

3.1 实验测试方案

这里主要针对前面提出的方法框架进行测试, 以奔腾 Pentium4, 1.73GHz 单 CPU 的个人电脑为平台, 在 VC++6.0 的开发环境中进行试验。关于测试的数据集, 本文收集了 600 张不同大小和视角的图片用于训练人脸检测器, 其中 200 张用于正面人脸检测器, 200 张用于全左侧人脸检测器, 200 张用于半左侧人脸检测器。全右侧人脸检测器和半右侧人脸检测器, 是通过对被训练的全左侧人脸检测器和被训练的半左侧人脸检测器分别镜像处理获得的。

同时, 本文也收集了 600 张不同大小和视角的图片用于训练人眼检测器, 其中 200 张用于全左侧睁眼检测器, 200 张用于正面睁眼检测器, 200 张用于闭眼检测器。全右侧睁眼检测器也是通过对被训练的全左侧睁眼检测器镜像处理获得的。在具体测试中, 将前面提出的方法框架分成两级进行相关测试。

(1) 第一级是测试本文方法中去掉跟踪阶段的检测阶段。在该阶段中, 利用 CMU+MIT 正面人脸数据库 (该数据库总共包含 130 张具有 507 个正面人脸的图片)^[18]和 CMU 侧面人脸数据库 (该数据库包含 208 张具有 441 个人脸其中 347 个是侧面角度的图片)^[19]来测试正面人脸和侧面人脸的眼睛检测。具体地说, 第一步先检测人脸, 第二步再检测眼睛。另外, 也分别应用文献[18]和[19]中的方法, 先进行脸部检测, 再进行眼睛检测, 并与本文方法中的检测阶段进行相关比较。

(2) 第二级是测试眼部跟踪阶段, 即测试本文

提出的整个方法。在本级测试中, 收集了 80 个左右的多个人脸及多个角度的监控视频, 其帧速范围在 10fps 到 30fps 间, 用来测试本文中整体方法的眼部跟踪效果。并且这里在跟踪阶段, 也用通常的 Kalman 滤波器方法测试, 并与本文应用的 Unscented 滤波器方法效果进行比较。

3.2 实验结果及相关分析

(1) 眼部检测的测试结果如下

图 8, 图 9 显示了一些检测结果。其中对于在奔腾 Pentium 4 1.73 GHz 个人电脑上的一张 320×240 图像的运行时间: 对正面人脸的眼睛检测时间约为 20ms; 对多角度人脸的眼部检测时间约为 85 ms。

以下给出文献[18]和[19]中的典型方法与本文检测方法比较的统计结果, 其中给出了在检测过程中, 随着误警数量的增加, 被检测出的眼睛相对当时整个测试样本的正确率 (ROC) 的变化趋势。

从表 1 和表 2, 并结合图 8~图 10 能够看出, 由于在检测阶段本文方法优越的结构性能及合理的被选择的特征, 所以本文方法的检测阶段的效果相比被比较的典型方法要好一些。另外, 侧面人脸时检测的正确率要比正面人脸时的检测正确率低一些, 主要由于侧面人脸时有限的特征, 从而导致错误率的上升。

(2) 眼部跟踪的测试结果如下

从表 3 及图 11~图 12, 可以看出, 随着帧速的提高, 尽管两种滤波器的预测精度都因为滤波估计中的时间消耗而降低, 但 Unscented 滤波器相比 Kalman 滤波器在眼部跟踪上更鲁棒, 因为在人的通常行走过程中, 其眼部运动的多样性常常是非线性的, 这就使得线性滤波器很难跟踪这种运动。

综合以上两个阶段的测试结果, 本文的方法在一定程度上是可行和合理的。



图 8 一些应用 CMU+MIT 数据库正面人脸的眼部检测结果



图 9 一些应用 CMU 数据库的多个人脸及多角度人脸的眼部检测结果

表 1 用 CMU+MIT 正面人脸数据库进行眼睛检测的结果

误警方法	10	22	31	45	51	61	65
本文方法 (%)	81.1	86.6	88.2	90.4	91.7	93.1	93.4
Rowley 方法 (%)	80.2	85.2	86.0	89.2	90.7	92.8	92.9

表 2 用 CMU 侧面人脸数据库进行多角度眼睛检测的结果

误警方法	12	25	30	41	50	64	73
本文方法 (%)	76.5	80.4	84.9	86.3	89.3	92.1	93.0
Schneiderma 方法 (%)	75.2	82.6	84.7	85.5	87.5	91.5	92.7

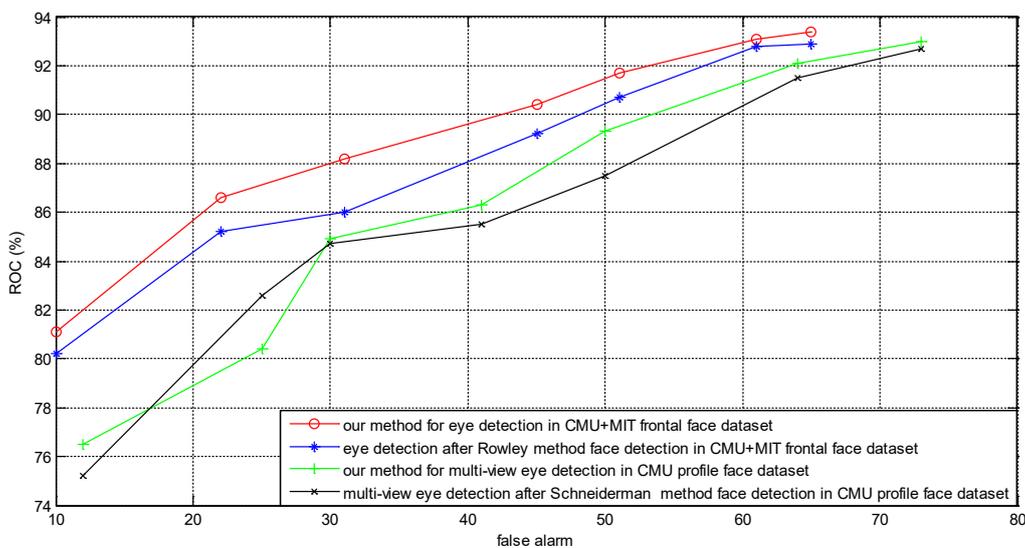


图 10 CMU+MIT 正面人脸数据库与 CMU 侧面人脸数据库中眼部检测的 ROC

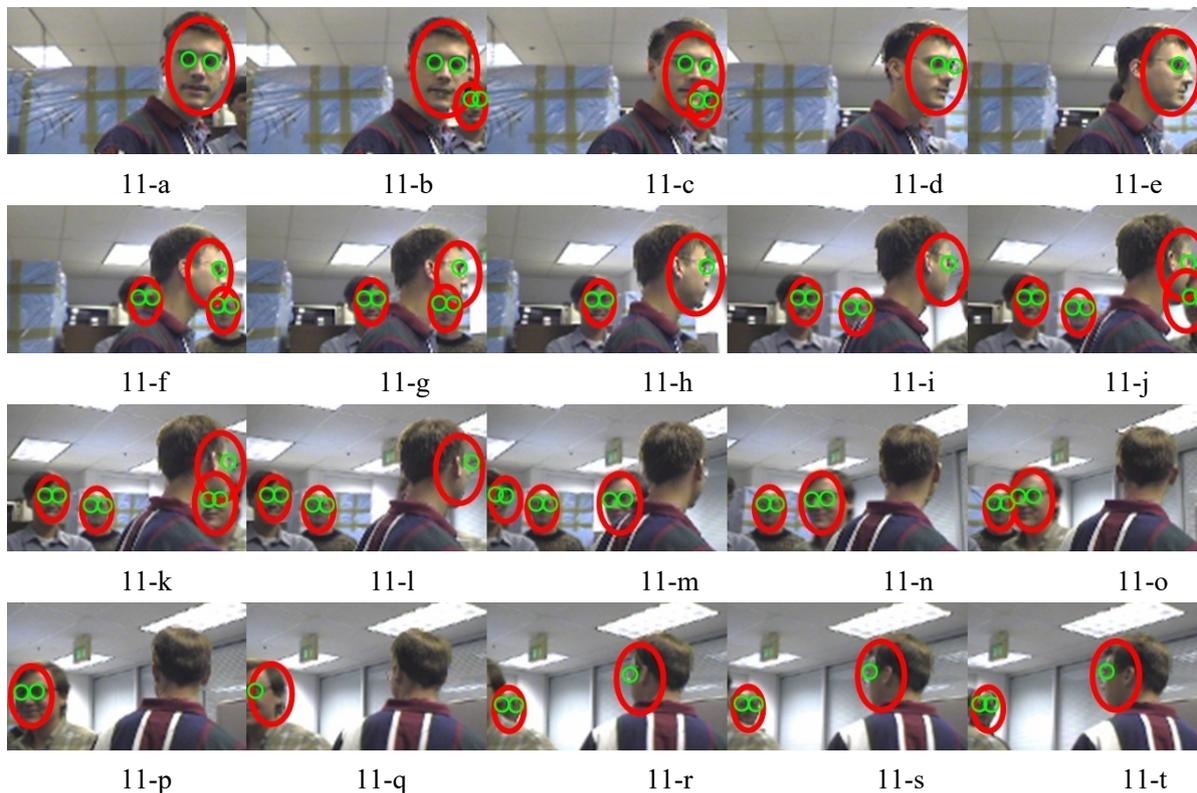


图 11 一些多人及多角度眼部跟踪结果

表 3 UNSCENTED 滤波器与 KALMAN 滤波器用于眼部跟踪的正确预测率的比较

帧速 (fps)	10	13	17	20	25	28	30
Unscented Filter	94.7	83.8	80.5	77.3	74.1	71.5	70.2
Kalman Filter	76.2	63.8	47.4	40.5	32.9	26.4	23.6

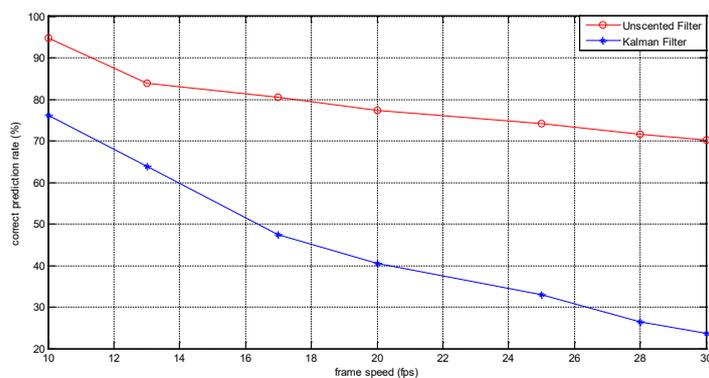


图 12 Unscented 滤波器 与 Kalman 滤波器用于眼部跟踪测试的比较

4 总结

本文提出一个针对多人及多角度眼部检测和跟踪的框架方法。该方法的检测阶段主要基于 Adaboost 方法, 跟踪阶段主要基于 Unscented 滤波器

的非线性滤波估计法。通过滤波的状态估计和检测的修正, 将这两个阶段巧妙结合, 实现了对视频的眼部的检测跟踪。在与一些相关的典型方法的比较试验中, 测试结果发现无论是在检测阶段还是在跟

踪阶段, 该方法都在一定程度上有比较优越的性能。

后续的研究一方面将设法进一步提高该框架方法对于不同光照和遮挡条件下的鲁棒性, 另一方面将设法进一步分析眼部中的眼珠注意力, 并将其注意力的方向在三维场景中描绘出, 以供安全监控领域提供相应的分析线索。

参考文献

- [1] Kington, J.M., et al., Impaired eye expression recognition in schizophrenia[J]. *Journal of Psychiatric Research*, 2000. 34(4): p. 341-347.
- [2] Ji, Q. and X. Yang, Real-time eye, gaze, and face pose tracking for monitoring driver vigilance[J]. *Real-Time Imaging*, 2002. 8(5): p. 357-377.
- [3] 颜红金, 张永林, 医用眼睛图像检测系统的构建[J]. *计算机工程与设计*, 2010(24): p. 5339-5342.
- [4] YAN Hong jin ZHANG Yong-lin Construction of medical eye image detection system[J], *COMPUTER ENGINEERING AND DESIGN*, 2010(24): p. 5339-5342.
- [5] De Santis, A. and D. Iacoviello, Robust real time eye tracking for computer interface for disabled people[J]. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2009. 96(1): p. 1-11.
- [6] Poole, A. and L.J. Ball, Eye tracking in human-computer interaction and usability research: current status and future prospects[M]. *Encyclopedia of human computer interaction*, 2005: p. 211-219.
- [7] Dodgson, N.A., Autostereoscopic 3D displays[J]. *Computer*, 2005. 38(8): p. 31-36.
- [8] Zhou, Z.H. and X. Geng, Projection functions for eye detection[J]. *Pattern Recognition*, 2004. 37(5): p. 1049-1056.
- [9] 程文冬, 魏庆媛, 非约束条件下驾驶人眼睛检测与跟踪方法研究[J]. *西安工业大学学报* 2019. 039(002): p. 203-210.
- [10] CHENG Wendong, WEI Qingyuan, Research on Driver Eye Detection and Tracking under Non-Restraint Conditions[J], *Journal of Xi'an Technological University*, 2019. 039(002): p. 203-210.
- [11] Yan, C., Y. Wang, and Z. Zhang, Robust real-time multi-user pupil detection and tracking under various illumination and large-scale head motion[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2011.
- [12] 朱真真, 等, 基于 Kinect 的人脸眼部状态实时检测[J]. *大连民族学院学报*, 2015. 17(1): p. 81-81.
- [13] ZHU Zhen-zhen, WANG Wei, DUAN Xiao-dong et al. Real-time Detection of Facial Eye Status Based on Kinect Sensor[J], *Journal of Dalian Nationalities University*, 2015. 17(1): p. 81-81.
- [14] Yang, M., et al., AdaBoost-based face detection for embedded systems[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010. 114(11): p. 1116-1125.
- [15] 严超, 王元庆, 张兆扬, 基于 AdaBoost 和 Kalman 算法的人眼检测与跟踪[J]. *南京大学学报* 2010(06): p. 681-687.
- [16] Yan Chao, Wang Yuan-Qing, Zhang Zhao-Yang Eye detection and tracking based on AdaBoost and Kalman algorithms[J], *JOURNAL OF NANJING UNIVERSITY (NATURAL SCIENCES)* 2010(06): p. 681-687.
- [17] Schapire, R.E. and Y. Singer, Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions[J]. *Machine learning*, 1999. 37(3): p. 297-336.
- [18] Freund, Y. and R.E. Schapire. Experiments with a new boosting algorithm[C]. in *MACHINE LEARNING --INTERNATIONAL WORKSHOP THEN CONFERENCE-*. 1996. Citeseer.
- [19] Lienhart, R., A. Kuranov, and V. Pisarevsky, Empirical analysis of detection cascades of boosted classifiers for rapid object detection[J]. *Pattern Recognition*, 2003: p. 297-304.
- [20] Marie, E., K. Hoehn, and B. Cleary, *Human Anatomy and Physiology*[M]. Science, 1998.
- [21] Julier, S., J. Uhlmann, and H.F. Durrant-Whyte, A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 2000. 45(3): p. 477-482.
- [22] Rowley, H.A., S. Baluja, and T. Kanade, Neural network-based face detection[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1998. 20(1): p. 23-38.
- [23] Schneiderman, H. and T. Kanade. A statistical method for 3D object detection applied to faces and cars[C]. in *cvpr*. 2000. Published by the IEEE Computer Society.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

