

# 自由立体显示系统中的人眼跟踪定位方法

王 剑

(国家知识产权局专利局专利审查协作江苏中心 苏州 215000)

**摘要:** 人眼跟踪定位是自由立体显示系统的重要组成部分,系统通过获取两眼的精确位置可以使观看者无辅助观看设备情况下获得清晰的三维图像。采用由粗到精的方法,在对人脸区域进行跟踪的基础上进行人眼初检测和瞳孔精确定位。红眼效应可有效筛选眼部区域候选点,利用脸部 Adaboost 级联分类器检测结果构造似然函数用于粒子滤波实时人脸跟踪,在此基础上进行基于 Adaboost 方法的人眼初定位和基于投影方法的瞳孔精定位。实验表明,该算法使人眼跟踪与精确定位速度之和达到 100 帧/s,满足系统实时精确的要求。

**关键词:** 红眼效应; Adaboost; 粒子滤波; 投影

**中图分类号:** TP2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Eye tracking and locating method in autostereo display system

Wang Jian

(Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of the Patent Office, SIPO, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Eye Tracking and locating is very important in autostereo display. When the system get the precise location of the double eyes and adjust the according parameters, the viewer can have the true feeling of stereo scene. The article uses a general to specific way to track the face and then locate the eye precisely. The red eye effect can help choose the candidates of eye regions. We use Adaboost to detect face and eye. In the face tracking part, we use the Adaboost cascade result to generate the likelihood model in particle filtering. And last the projection method is used to find the location of the pupil. The experiment shows that this method has greatly improved the speed of eye tracking and locating to 100f/s and well satisfied the requirements of the system.

**Keywords:** red-eye effect; Adaboost; particle filter; projection

## 1 引言

自由立体显示技术作为前沿科技领域,在 20 世纪 90 年代以来获得了迅速的发展,是当今立体显示的主流技术。与传统立体显示技术不同,观看者无需眼镜、头盔等辅助工具,而是通过实时准确地测量观看者眼睛位置变化调整光栅参数,将两幅有视差的图像分别投影到观看者的两只眼睛里,从而使观看者感觉到准确的立体效果。可见,人眼跟踪定位是自由立体显示系统正常运作的基础,实时和精确是系统对它的主要要求。

人眼位置实时探测主要包括检测、跟踪和精确定位 3 部分。人眼检测可分为被动和主动两类<sup>[1-3]</sup>。其中主动检测是指依靠特殊的光源照射人脸,然后利用目标所呈现出的特有图像先验信息进行检测,速度快,但设备复杂。主动检测中应用最多的是红眼效应,文献[4]将其与 PCA 方法结合,可以有效跟踪人眼,但是由于采用支持向量机算法,检测跟踪速度有限,精度也无法满足系统要求。为了同时满足系统对速度和精度

的要求,将几种快速检测跟踪算法融合,提高跟踪速度,同时由粗到精进行精确人眼定位。首先利用近红外光照射下,瞳孔和脸部其他区域的强烈反差即红眼效应有效的提取眼睛候选点,然后采用快速 Adaboost<sup>[5-6]</sup>方法判断候选点位置是否为人脸和人眼,同时由于人的运动具有非线性非高斯的特性,将 Adaboost 级联分类器检测结果融入粒子滤波器<sup>[7-8]</sup>进行人脸跟踪,最后对判定人眼区域利用混合投影方法进行瞳孔精确定位,调节系统参数,完成自由立体显示。

## 2 主要技术概述

### 2.1 红眼效应及候选点选择

进入人眼的近红外光经过晶状体被视网膜按原路反射,被摄像装置接收到后,便会产生红眼效应。以摄像头场频驱动近轴和远轴 LED,使之成为以场频交替点亮的近红外光主动光源。图 1(a)奇场图像为远轴光照射,反射光不能被摄像头接收,瞳孔处为暗,图 1(b)偶场图像为近轴光照射,瞳

孔处为亮,同时使远轴光亮度大于近轴光亮度可以有效减少面部其他候选点。将奇偶场图像相减并进行阈值化后即可得到人眼候选点以及由于运动状态造成的其他非人眼噪点,如图 1(c)所示。一幅  $110 \times 100$  的面部图像经红眼效应筛选眼部候选点减至 194 个,搜索量减至原来的  $1/50$ 。



图 1 红眼效果

## 2.2 人脸跟踪方法

经过红眼效应初步筛选人眼候选点后,受背景、光照和运动的影响仍须进行人眼区域判定。采用先跟踪人脸,再在人脸区域中检测人眼的方法。具体为:对初始帧进行人脸检测并以检测人脸作为模板,依据模板生成粒子进行人脸跟踪,对跟踪结果进行人眼检测,将人眼检测结果反馈到跟踪过程作为跟踪成功与否的标志,若检测到人眼则继续跟踪过程,否则重新进行人脸检测更新模板。人脸和人眼检测部分均采用 Adaboost 算法,考虑到 Adaboost 算法的高效性,利用其层间概率分布作为粒子滤波过程中的似然函数,将检测和跟踪过程有效结合在一起。

### 2.2.1 Adaboost 检测方法

Adaboost 算法的基本思路是首先挑选一系列易于计算的 harr-like 特征,然后采用连续 Adaboost 算法学习基于这些 Harr 型特征的查找表(LUT)型弱分类器,采用瀑布型的级联强分类器迅速地去除非目标样本,达到检测的目的。

假设 Adaboost 训练的级联分类器由  $K$  层强分类器组成,第  $k$  层强分类器可表示为式(1),即第  $k$  层强分类器含有  $N_k$  个弱分类器, $h_k^n$  为其中第  $n$  个弱分类器, $Th_k$  为该强分类器对应阈值,对于给定输入  $x$ ,输出为  $H_k(x) = 1$  表示通过该强分类器检测。

$$H_k(x) = \text{sign}\left(\sum_{n=1}^{N_k} h_k^n(x) - Th_k\right) \quad (1)$$

### 2.2.2 基于 Adaboost 的粒子滤波

粒子滤波器是采用一系列随机抽取的样本(粒子)来代替状态的后验概率分布的序列蒙特卡罗滤波方法,与卡尔曼滤波不同,它能够有效地处理非线性非高斯系统运动状态估计,适于无规则的人体运动。

假设  $t$  时刻目标的状态参量和观测参量分别为  $X_t$  和  $Y_t$ ,粒子滤波过程即为用一组加权的粒子  $S_t = \{s_t^{(n)}, \omega_t^{(n)}\} (n = 1, \dots, N_t)$  近似表示后验概率分布,粒子  $s_t^{(n)}$  权值  $\omega_t^{(n)} \propto p(Y_t | X_t = s_t^{(n)})$ ,此时,目标状态的估计值为:

$$\hat{X}_t = E(S_t) = \sum_n \omega_t^{(n)} s_t^{(n)}, \sum_n \omega_t^{(n)} = 1 \quad (2)$$

具体跟踪过程分析如下:

1) 选取目标模板并对粒子状态进行初始化。目标模板

可以是图像部分区域的像素点灰度、轮廓角点纹理等底层特征,也可以是频域小波等高层特征。本文中设粒子  $s_t$  为  $(x_t, y_t, \omega_t)$ ,表示中心为  $(x_t, y_t)$  长宽均为  $\omega_t$  的图像块。将初始检测人脸作为模板以均匀概率分布对粒子进行初始化。

2) 状态转移过程。人观看屏幕时坐在电脑前,摄像头朝斜上方拍摄,一般只能拍摄到人的上半身,观看屏幕上半身左右晃动频率较高,因此有别于一般的走动人像,此时人脸的运动一阶 AR 模型便可描述。粒子  $s_t$  的状态转移模型为  $s_t = A s_{t-1} + B v_{t-1}$  对于  $x_t, y_t, \omega_t$  可分别描述为:

$x_t = a_1 x_{t-1} + b_1 v_{t-1}, y_t = a_2 y_{t-1} + b_2 v_{t-1}, \omega_t = a_3 \omega_{t-1} + b_3 v_{t-1}$  式中:  $a_1 = a_2 = a_3 = 1, b_1, b_2$  分别为粒子的  $x, y$  方向运动半径,  $b_3$  为粒子尺度变化半径,  $v_{t-1}$  为  $[-1, 1]$  内的随机数。

3) 系统观测模型。对传播后的粒子观察其可能状态与目标状态的相似程度并以此决定粒子的权重。将 Adaboost 检测过程与粒子滤波过程相结合,由 Adaboost 级联分类器检测结果构造似然函数<sup>[9-10]</sup>。由  $K$  层强分类器组成的级联分类器中,假定粒子通过级联分类器的前  $m$  层,则通过前  $m$  层累加得层间概率密度估计函数为式(3),即通过级数越多,粒子是人脸的可能性越大,与 Adaboost 分类器检测过程是一致的:

$$C(s_t) = \frac{m(m+1)}{K(K+1)} \quad (3)$$

对层间概率密度估计函数进行高斯型调制并定义观测概率密度函数如式(4)所示:

$$p(Y_t | X_t = s_t^{(n)}) = \exp\left(-\frac{(1 - C(s_t^{(n)}))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

以观测概率密度函数结果更新粒子权值:

$$\omega_t^{(n)} = \omega_{t-1}^{(n)} p(Y_t | X_t = s_t^{(n)}) \quad (5)$$

并将上述权值归一化可得:

$$\omega_t^{(n)} = \omega_{t-1}^{(n)} / \sum_{n=1}^{N_t} \omega_{t-1}^{(n)}$$

4) 后验概率计算。即目标跟踪中期望的目标参数由各粒子加权获得如下:

$$\hat{X}_t = E(S_t) = \sum_n \omega_t^{(n)} s_t^{(n)} \quad (6)$$

5) 粒子重采样。当某些粒子权值太小时,就从权值较大的粒子上衍生出一些粒子来取代它们。重采样过后,各粒子权值重新设置为 1,避免退化现象。此后进入下一状态转移过程。

## 2.3 人眼精确定位

在自由立体显示系统中,精确定位人眼一方面可以正确调整系统参数使观看者能够观看到理想的立体图像;另一方面也可获得观看者的三维信息,是一个双向的过程。而通过 Adaboost 等统计学习的方法只能进行眼睛类别的判别,不能做到对瞳孔位置的精确定位。人眼精确定位的方法一般有基于投影方法,基于对称和 hough 形态学方法。由于系统速度的要求,采用速度较快的混合投影的方法。

人眼跟踪定位过程如图 2 所示,图 2(a)为 Adaboost 人

脸检测结果,将此检测结果作为模板,图2(b)为在模板基础上衍生出的粒子,状态转移过程后计算似然函数更新粒子权值得到跟踪结果如图2(c)示,同时对人眼进行检测并进行瞳孔精确定位。



图2 人眼跟踪定位过程

### 3 实验结果分析

计算机配置为 Celeron 2.93 G CPU,内存 512 M。CCD 采集的图像分辨率为  $640 \times 480$ ,帧率为 25 f/s。实验过程包括 3 个步骤:面部和眼部区域 Adaboost 分类器训练、粒子滤波相应参数选取和人眼精确定位。

针对室内近红外光特定拍摄条件进行 Adaboost 分类器训练,人脸样本归一化为  $20 \times 20$ ,训练得 11 级包含 790 个特征的级联人脸分类器,人眼样本归一化为  $15 \times 15$  训练得 4 级包含 100 个特征级联人眼分类器。在脸部样本选取时同时考虑到人脸的各种姿态,增加仰视和侧视人脸正样本数量。由于人眼检测只在脸部范围内进行,在非人脸样本选取时只考虑脸部内非人脸样本。

粒子滤波过程中影响跟踪效果的因素主要有粒子的数目、状态转移模型和观测模型。在对脸部区域进行跟踪过程中选用一阶状态转移模型,实验中选取  $(b_1, b_2, b_3)$  分别为  $(w, 0.5w, 0.5w)$ ,即一般情况下人脸  $x$  方向位移比  $y$  方向位移要大,改变粒子数目,统计得到跟踪效果如表 1 所示,其中跟踪位置误差为手动标定人脸位置与实际跟踪人脸位置水平坐标之差的均值,跟踪比为在检测跟踪过程中跟踪帧数与视频总帧数之比。由表 1 可知,随粒子数目减少,跟踪误差增大,单帧跟踪时间迅速减少,图像跟踪失败帧数增多。实验采用粒子数为 100,此时人脸跟踪时间为 5 ms,与人脸定位时间相加,单帧跟踪定位时间约为 10 ms。

表 1 粒子滤波统计结果

| 粒子数(个)      | 30      | 50      | 100     | 150     |
|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 单帧跟踪时间/ms   | 1.922 3 | 2.970 2 | 5.042 4 | 7.327 3 |
| 跟踪位误差/pixel | 15      | 12      | 10      | 10      |
| 跟踪比 100%    | 55%     | 71%     | 90%     | 95%     |

实验中相应图像帧的跟踪定位结果如图 3 所示。



图3 人眼跟踪定位结果

## 4 结 论

自由立体显示中对人眼跟踪实时性和精确性有很高的要求,否则观看者无法获得良好的立体视觉效果。本文将快速人眼检测跟踪与精确人眼定位相结合,Adaboost 已是一种快速实时检测方法,对于  $320 \times 240$  图像单帧检测速度在 30 ms,而红眼效应有效的减少了候选点,同时利用包含 Adaboost 层间概率分布的粒子滤波进行脸部区域跟踪,在不增加额外信息的同时进一步提高了跟踪速度,在眼部初检测后,利用混合投影方法进行精确定位,满足系统实时精确的人眼定位要求。由于采用主动光照明,在配戴眼镜的情况下眼镜反光会影响人眼精确定位,须对这种情况作进一步研究提高系统精度。

## 参考文献

- [1] 陈健. 基于图像特征的快速瞳孔提取算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 203-210.
- [2] ZHANG G, CHEN J, SU G, et al. Double-pupil location of face images [J]. Pattern Recognition, 2013, 46(3): 642-648.
- [3] 迟健男. 双摄像机双光源视线追踪系统标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 883-891.
- [4] 柯丽. 改进的 AdaBoost 人脸检测方法[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 113-118.
- [5] 刘长, 王雪, 张星. 基于实时预测学习分类的脸像快速检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 36-41.
- [6] 刘春生, 常发亮, 陈振学, 等. 改进的高斯肤色模型及其在人脸检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1117-1121.
- [7] 陈龙, 郭宝龙, 孙伟. 基于 FCM 聚类的粒子滤波多目标跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2536-2542.
- [8] 郭君斌, 郭晓松, 雷磊, 等. 基于改进粒子滤波算法的人眼跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1720-1725.
- [9] 初红霞, 秦进平, 谢忠玉, 等. Adaboost 检测和混合粒子滤波融合的多目标跟踪[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 76-81.
- [10] MAROULAS V, STINIS P. Improved particle filters for mult-target tracking [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(2): 602-611.

## 作者简介

王剑, 国家知识产权局专利局专利审查协作江苏中心助理研究员, 主要审查方向为图像通信、网络通信及立体视觉技术。

E-mail: wangjian\_2@sipo.gov.cn