

文章编号: 1001-0920(2009)09-1345-06

视线追踪系统眼部特征检测及视线方向计算方法研究

迟健男, 张 闯, 胡 涛, 颜艳桃, 刘 洋

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 基于单视觉主动红外光源系统, 提出了一种视线检测方法. 在眼部特征检测阶段, 采用投影法定位人脸; 根据人脸对称性和五官分布的先验知识, 确定瞳孔潜在区域; 最后进行人眼特征的精确分割. 在视线方向建模阶段, 首先在头部静止的情况下采用非线性多项式建立从平面视线参数到视线落点的映射模型; 然后采用广义回归神经网络对不同头部位置造成的视线偏差进行补偿, 使非线性映射函数扩展到任何头部位置. 实验结果及在交互式图形界面系统中的应用验证了该方法的有效性.

关键词: 视线追踪; 平面视线参数; 非线性多项式; 广义回归神经网络

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

Eye characteristic detection and gaze direction calculation in gaze tracking system

CHI Jian-nan, ZHANG Chuang, HU Tao, YAN Yan-tao, LIU Yang

(School of Information and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Correspondent: CHI Jian-nan, E-mail: sy_jnchi@126.com)

Abstract: A gaze tracking method is proposed based on active infrared source system. In the eye feature detection stage, projection method is applied to locate face. Symmetry axis of face is detected, potential region of pupil is found based on the knowledge about facial structure, and human eyes features can be precise segmented. In the eye-gaze modeling stage, a model with nonlinear polynomial to map the gaze parameters to gaze point under the circumstances of static head is set up. Then the deviation of gaze caused by different head position is compensated by GRNN neural network, so that nonlinear mapping function can be extended to any head position. So gaze can be estimated accurately under head movement. The experiment results and the applications in interactive graphical system show the effectiveness of this method.

Key words: Gaze tracking; Gaze parameter; Nonlinear polynomial; Generalized regression neural network

1 引 言

视线追踪是利用机械、电子、光学等各种检测手段获取受试者当前“注视方向”的技术, 广泛应用于人机交互、助残、虚拟现实、车辆辅助驾驶、人因分析等领域. 按照系统构成和采用的检测方法视线追踪技术可以粗略划分为侵入式和非侵入式两种. 基于数字视频分析(VOG)的非侵入式视线追踪技术具有对人干扰小、容易操作和精度较高的特点, 具有较大的研究发展空间.

VOG 视线追踪技术普遍采用基于主动红外光照的瞳孔-角膜反射方法, 即通过设置远离光轴的红

外光源在角膜上形成反射点(普尔钦斑). 提取普尔钦斑中心到瞳孔中心的矢量作为视线方向参数, 利用眼球成像模型或映射模型来估计视线方向. 因此基于瞳孔-角膜反射的视线追踪技术由视线特征参数提取和视线估计模型建立两部分组成.

瞳孔-角膜反射方法在视线特征参数提取过程中普遍采用亮暗瞳差分方案, 即设置与摄像机镜头同轴的内外环近红外(IR)光源, 控制光源交替亮暗, 产生亮瞳和暗瞳隔帧交替出现的视频序列. 利用相邻帧亮暗瞳图像的差分使瞳孔信息相对突出, 消除背景影响, 便于在整幅脸部图像中快速捕捉眼睛

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2009-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574090); 国家 863 计划项目(2007AA01Z160); 博士后科学基金项目(20064000400).

作者简介: 迟健男(1967—), 男, 沈阳人, 副教授, 博士后, 从事人机交互、车辆辅助驾驶的研究; 张闯(1982—), 男, 辽宁鞍山人, 博士生, 从事图像处理与分析、视线追踪等研究.

和在局部眼睛图像中精细准确地分割瞳孔^[14]。亮暗瞳差分方案一般采用阈值法分割瞳孔^[5-7]。由于头部及瞳孔的随机运动和红外光源的交替亮灭,亮暗瞳差分图像除保留瞳孔信息外,不可避免地残留其他干扰区域。采用阈值法分割差分图像,将会产生干扰区块。为了提高检测的稳定性,文献[8]通过设置动态阈值消除不同光照条件下背景影响,但动态阈值本身就存在较大误差。[9]结合眼睛外观,进行眼部特征的滤波和识别。[10]对差分图像进行形状滤波,以消除外部光线干扰。[11,12]在阈值化后的差分图像中,通过支持向量机对瞳孔候选区域进行分类,以排除头部随机运动产生的干扰区域。但该方法的识别效果过于依赖样本,对新的使用者的识别效果明显下降。

瞳孔-角膜反射方法按系统构成和采用的视线估计模型大致可分为两种:

1) 单摄像机单光源系统通过检测普尔钦斑中心到瞳孔中心的平面视线参数,采用线性和非线性多项式建立视线参数到视线屏幕落点的映射模型^[13,14],只能在头部静止或微动状态下检测视线落点。为解决单摄像机系统头动下的视线检测,文献[15,16]采用统计模型,通过采集不同样本不同头部姿态的眼部特征参数作为输入,以对应的盯视点坐标作为输出,训练广义回归神经网络(GRNN)或支持向量回归建立视线参数到视线落点之间的统计模型来估计视线。该方法定义的视线落点输出范围为全屏幕,容易在视线检测过程中产生偏离理想落点位置的粗大误差。

2) 多摄像机多光源系统通过立体视觉检测普尔钦斑中心到瞳孔中心的三维视线参数,采用眼球成像几何模型将视线参数换算成视线方向。因此可检测头部运动状态下的视线方向。

单摄像机系统结构简单,使用简便,在人因分析等领域有着普遍的应用价值。多摄像机系统需要精确测定计算机屏幕、光源的相对位置关系^[17],系统标定程序复杂,成本相对较高。本文的视线追踪系统采用单摄像机单光源,通过瞳孔-角膜反射方法获取视线方向,立足于开发一种具有普适应用价值的低成本视线追踪系统。在瞳孔-角膜反射分割与中心定位阶段,针对阈值法的不足,采用由粗到精的分割方案,提出一种眼部特征检测方法。首先在差分图上定位人脸;然后根据人脸的对称性和五官分布的先验知识,确定瞳孔潜在区域;最后进行人眼特征的精确分割。在视线方向模型建立阶段,针对统计模型方法的不足,提出一种基于非线性多项式和GRNN神经网络的映射模型,首先采用非线性多项式模型对视

线进行估计,将视线落点确定在一个局部范围内;然后用经过训练的GRNN神经网络计算头部运动引起的全屏视线估计误差;用估计的误差对视线进行补偿,实现头部运动情况下的视线方向检测。

2 平面视线参数检测

2.1 视线追踪系统

视线追踪系统由双环型红外光源,滤光片,摄像机镜头,图像采集卡,CCD,帧同步卡,单片机,主机和显示屏构成。双环型红外光源产生亮瞳现象和普尔钦斑。受试者注视屏幕,由CCD摄像机获取人脸图像,通过图像采集卡传到主机。主机通过特征参数提取和视线映射函数得到视线落点,显示在屏幕上。

2.2 平面视线参数检测

瞳孔和普尔钦斑检测及中心定位是瞳孔-角膜反射方法视线特征参数提取中的共性问题,也是本文视线方向检测的必要前提。平面视线参数是指由单摄像机获得的瞳孔中心到普尔钦斑中心的矢量。

2.2.1 瞳孔检测方法

1) 亮瞳和暗瞳图像差分检测瞳孔。本文系统采用亮暗瞳差分方案检测眼部特征,使瞳孔特征突出并对外部干扰不敏感。

2) 基于数学形态学的图像滤波及瞳孔目标修形。头部随机运动和环境及光源光照的变化,使差分图像除保留瞳孔外还保留其他头部信息和杂散噪声点,并且瞳孔的形状也不规则,可能会出现毛刺或小的缺口,因此要对差分图像滤波。本文采用数学形态学中的开运算对差分图像滤波并对瞳孔目标修形,设亮暗瞳差分后的图像为 f ,选取合适大小结构元素 B ,有

$$f = f \ominus B \oplus B. \quad (1)$$

3) 人脸定位及瞳孔潜在区域检测。

Step1 人脸定位。亮暗瞳图像差分后图像数据相对简单,瞳孔、头部边界等占主要成分。通过直方图法选择分割阈值,并采用比此阈值低的保守阈值分割头部图像,得到二值图像。对二值图像的每一行和每一列像素值进行累加,得到垂直列向量 $V(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 和水平行向量 $H(h_1, h_2, \dots, h_M)$ 。搜索行向量和列向量,大于一定阈值的行向量和列向量区间即为头部对应区域,用白色框标注头部区域。将二值化头部区域作为瞳孔目标出现的潜在区域。

Step2 对称轴检测。在标注的头部区域内,根据人脸五官分布的先验知识,眼睛一般位于人脸 $1/2$ 以上,眉毛一般位于人脸头顶以下 $1/3$ 处,考虑到头部运动可能使人脸部分区域超出视场范围,因此保守划定人脸区域下方 $1/3$ 以上和头顶 $1/4$ 以下的部位为人眼区域。

在暗瞳图像人眼区域,利用头部轮廓的对称性,采用文献[18]中描述的投票技术估计头部的对称性,求取头部垂直方向的对称轴.首先在暗瞳图像中对上述人眼区域图像采用 Sobel 算子提取梯度图像,选择自适应阈值方法分割梯度图像获取二值轮廓图像.头部可能宽度范围是头部区域的左边和右边,因此创建累积矩阵 $A[col]$,并初始化为 0.搜索 IMG,执行下列步骤:

```

For each row
  For each pair of non-zero (pixels  $x_1, y_1$ ) and ( $x_2, y_2$ ) in the current row,
  Do
  {
    Distance =  $|x_1 - x_2|$ ;
    Axis =  $(x_1, x_2)/2$ ;
    if(distance > low_thr and distance < up_thr)
      A[axis] = A[axis] + 1.
  }

```

在 $A[col]$ 中找出最大元素,该最大值的索引 col 指出了头部最有可能的对称轴.

Step3 瞳孔潜在区域确定.确定了人眼区域和大致的对称轴后,人眼区域的对称轴两侧即为瞳孔潜在区域.

Step4 瞳孔检测.在差分图像的瞳孔潜在区域内,选择一个较低的阈值对图像进行二值化操作.由于将瞳孔限制在一个很小的区域,阈值的选择不必很严格,可以采用较低的阈值进行瞳孔的二值化.虽然瞳孔区域与原图比较范围大大缩小,但二值化仍然会遗留一些干扰团块,还需进一步在此区域内进行滤波.根据人瞳孔大小的先验知识和摄像机景深及成像放大倍数,将瞳孔区域的面积、最大长度、质心位置限定在一个范围内.将不符合上述指标的团块滤除,留下的即为瞳孔.

4) 基于 Hough 变换的瞳孔边界拟合. Hough 变换根据点线对偶原理,将图像空间的检测问题转化为参数空间,通过在参数空间进行简单的累加统计完成检测任务.其优点是受噪声和边缘间断的影响较小,并可在检测过程中确定边缘的方向和尺度.检测出瞳孔以后,在瞳孔区域内采用 Sobel 算子进行边缘检测,采用 Hough 变换拟合瞳孔边界并确定瞳孔圆心.

2.2.2 普尔钦斑分割

定位瞳孔之后,在瞳孔附近采取阈值法分割普尔钦斑,对普尔钦斑进行边缘检测并计算中心.

2.2.3 平面视线参数检测

平面视线参数检测流程如图 1 所示.瞳孔及普

尔钦斑检测结果如图 2 所示.

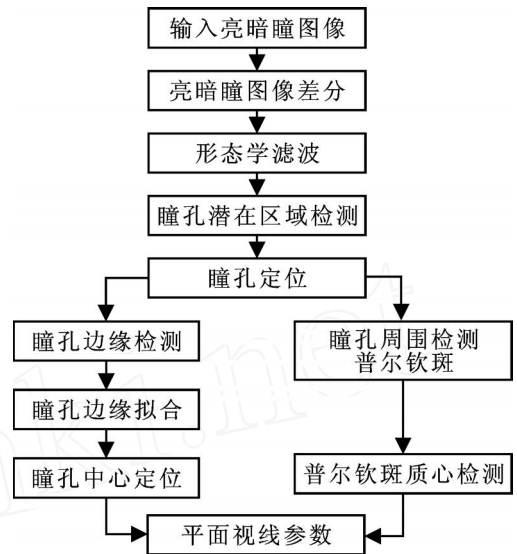


图 1 平面视线参数检测流程图

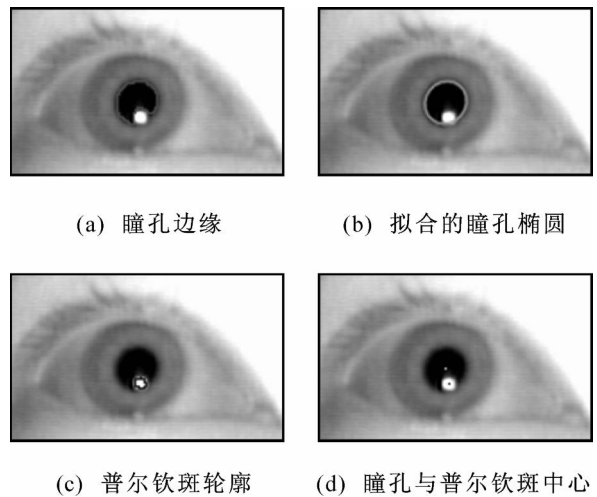


图 2 视线参数检测

2.2.4 与头动有关的视线参数检测

为了补偿头部运动对视线方向的影响,还需检测与头部姿态有关的瞳孔参数.研究表明,人脸的三维位置与瞳孔形态存在如下关系:1)人脸左右旋转时,瞳孔间距减小,两瞳孔之间的亮度差异增大;2)人脸方向偏离正前方时,瞳孔椭圆长短轴的比增大,即椭圆率增大;3)人脸远离相机时,瞳孔变小;4)人脸绕相机光轴转动时,瞳孔椭圆方向改变.

基于上述研究并参考文献[15],本文视线特征向量为

$$g = [x \quad y \quad l \quad p_x \quad p_y]$$

其中: (x, y) 为瞳孔中心到普尔钦斑的向量,反映眼球方向以及头部上下转动和左右转动; l 为左右瞳孔距离,反映头部与相机的距离变化; (p_x, p_y) 为瞳孔在图像中的位置,反映人脸的平移运动.特征向量 g 的变化可以充分反映头部和

眼球的运动,为有效的视线估计及头动补偿提供了依据.

3 基于非线性多项式和 GRNN 的平面视线参数到视线落点映射模型

头动状态下的视线映射模型建立是单摄像机单光源系统的关键问题.本文模型包括基于非线性多项式的视线拟合部分和 GRNN 网络的头动误差补偿部分,如图 3 所示.

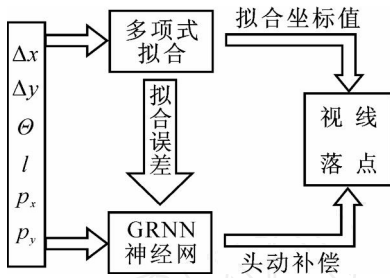


图 3 映射模型结构

首先在头部静止状态下,使受试者盯视屏幕上的标定点,标定多项式模型对视线进行估计;然后在头部不同姿态下,盯视屏幕上的标定点,计算盯视点视线落点误差,同时用经过训练的 GRNN 神经网络来计算头部运动引起的全屏视线估计误差;最后用估计的误差对视线进行补偿,得到最终的视线估计结果.

3.1 非线性多项式的直接拟合

平面视线参数和视线方向的关系很难用确定的解析式表示.但是在头部不动的情况下,研究者做了大量的工作,即采用如下多项式来拟合视线,可以取得较高的视线精度:

$$X = a x + b y + c x y, \quad (2)$$

$$Y = d x + e y + f x^2. \quad (3)$$

其中:式(2)拟合的是屏幕坐标的横坐标,式(3)拟合的是纵坐标; a, b, c, d, e, f 通过样本试验来确定;

x 和 y 为瞳孔-普尔钦斑向量的横坐标和纵坐标值.这种拟合方式确定的视线方向为头部基本不动的情况下的视线方向,明确地给出了该情况下视线与瞳孔-普尔钦斑向量之间的对应关系.但是在头部运动时,必然使视线方向有所偏差,所以下面采用 GRNN 网络对其进行补偿.

3.2 GRNN 神经网络头动补偿

GRNN 网络是基于概率密度函数且具有记忆功能的前馈神经网络,是径向基网络的一种特殊的形式,训练快,广泛应用于非线性函数逼近,在噪声环境下也能很好地实现其功能. GRNN 神经网络由 4 部分构成:输入层、隐含层、线性求和层和输出层.因为头部处于不同位置和姿态必然会引起检测到的

平面视线参数发生改变,即对视线的预测误差,而上节所叙述的视线计算方法并没有考虑到头动的影响,所以设计一个 GRNN 神经网络对头动的误差进行补偿.

广义回归神经网络的一般模型结构如图 4 所示.图中的神经网络有 Q 组输入向量,每组向量的元素个数有 R 个.

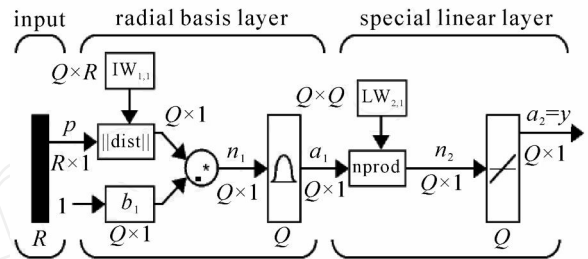


图 4 GRNN 神经网络模型

对于广义回归神经网络,其初始化就是对训练样本的学习过程.在建立网络模型时,将网络学习样本中的输入矢量转置赋给图 4 中 IW 的每行,将训练样本中的目标矢量,即屏幕的坐标点赋值给 LW ,这样相应的网络结构和各神经元之间的连接权值随之确定.网络的训练实际上只是确定光滑因子的过程.与传统的误差反向传输算法不同,广义回归神经网络的学习算法在训练过程中无需调整神经元之间的连接权值,只是改变光滑因子,从而调整各单元的传递函数,以获得最佳回归估计结果.

令光滑因子以增量在 (\min, \max) 内递增变化,在学习样本中,除去 1, 2 个样本,用剩余的样本训练神经网络,然后对该 1, 2 个样本进行预测,得到预测值与样本之间的误差序列,误差序列的均方值为

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i(X_i) - Y_i]^2. \quad (4)$$

作为网络性能的评价指标,将最小误差对应的光滑因子应用于最后的广义回归神经网络中进行预测.式(4)即可作为网络训练的终止准则,光滑因子的确定过程隐含了网络性能的验证过程.所设计的神经网络只有一个输出神经元,即只有一个输出.由于水平和垂直视线的显著区别,设计两个独立的 GRNN 网络,分别输出横、纵坐标的误差.然后用误差与相应的拟合坐标值相加得到最后的视线坐标.输入的参数必须要反映不同的头部位姿和与摄像机的相对距离,这样才能够发挥网络的曲线拟合能力,找到参数与视线之间的内在规律,即得到映射函数.在参数输入网络之前,对参数进行归一化处理,使参数在统一的数据范围内.

本文采集不同样本不同头部位置的数据对网

络进行训练,将参数经过多项式模型映射后的视线估计误差作为网络训练的目标输出,得到由输入向量 g 描述的头部位位置与视线估计误差之间的补偿关系为

$$(X, Y) = f(g). \quad (5)$$

4 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性,本文收集了大量的实验数据对网络进行训练并确定多项式模型参数.实验共有 8 人参加,数据采集过程中,受试者分别注视屏幕上的 9 个点,记录相关参数.每人都有头上仰、向下俯视、向左旋一角度和向右旋一角度等若干组数据.测试每个人的头动误差,即将数据经过 3.1 节的多项式拟合后的误差作为网络训练的目标矢量.

首先选取一系列样本对 GRNN 神经网络系数进行取定,当系数小于 0.8 后,GRNN 网络输出的均方误差已没有明显差别,说明网络已经达到了收敛的条件,此时网络具有最佳网络性能和最佳泛化能力.网络训练好后,给定一个输入向量即可确定一组误差(屏幕的横、纵坐标误差值),再加上多项式拟合的坐标,即可得到修正的坐标值.这里共取 9 个点在网络以及整个系统进行测试,将多项式直接拟合坐标与神经网络修正后的屏幕坐标进行比较,结果如图 5 所示.

显示屏幕上共 9 个点,所取数据包含用户正视前方的数据以及上下左右头动时眼睛的各个参数,头动的角度最大达到 45° .图 5 中,圆点表示根据用户的参数采用多项式直接拟合的屏幕坐标点,* 点表示经过神经网络头动补偿后得到的坐标点.从图中可以直观地看出网络对拟合精度的改善.图 6 以 x 坐标值为例,分别给出直接拟合和网络纠正后的坐标映射误差.纠正之前,误差最大为 284.7,且大部

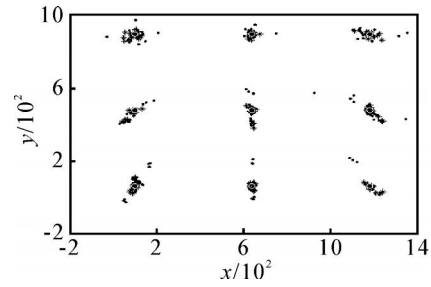
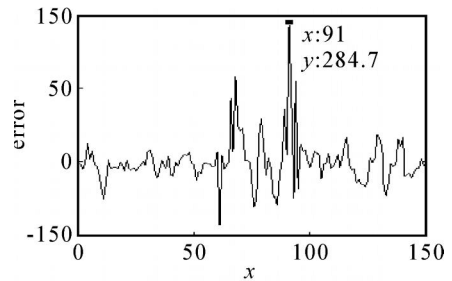
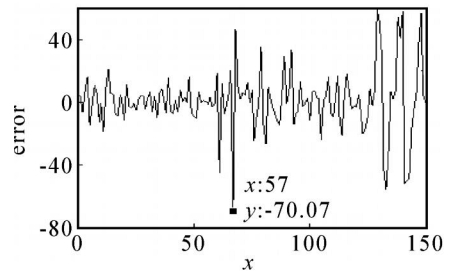


图 5 屏幕坐标点头动补偿效果

分误差在 50 ~ 100 的范围内.经过纠正后,误差最大只有 70 个像素点,且绝大部分误差在 20 个像素点左右.这样不管是从单个像素点还是从总体上看,都大大改进了映射的性能.表 2 给出了一部分视线坐标补偿后的值,并给出补偿前拟合的坐标.同样可以看出,补偿后计算出的视线精度更高.



(a) 多项式直接拟合的 x 坐标误差



(b) 网络纠正后的 x 坐标误差

图 6 直接映射和网络纠正后的 x 坐标误差

表 2 视线补偿与直接拟合精度比较

| 拟合 x 坐标 | 修正后 x 坐标 | 网络输出 | 拟合 y 坐标 | 修正后 y 坐标 | 网络输出 | 实际 x 坐标 | 实际 y 坐标 |
|-----------|------------|---------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 1175.1 | 1181.3 | 6.1561 | 481.63 | 476.05 | - 5.5783 | 1180 | 479 |
| 137.8 | 114.1 | - 23.7 | 897.24 | 904.75 | 7.517 | 100 | 898 |
| 105.77 | 86.78 | - 18.99 | 880.32 | 890.54 | 10.2195 | 100 | 898 |
| 630.34 | 641.87 | 11.534 | 902.86 | 893.33 | - 9.5312 | 640 | 898 |
| 1128.7 | 1176.9 | 48.176 | 918.68 | 892.35 | - 26.3377 | 1180 | 898 |
| 102.98 | 114.08 | 11.101 | 49.171 | 59.652 | 10.4803 | 100 | 60 |
| 85.509 | 99.99 | 14.481 | 54.568 | 68.684 | 14.116 | 100 | 60 |
| 627.76 | 635.93 | 8.1746 | 54.379 | 62.784 | 8.4052 | 640 | 60 |
| 625.63 | 634.08 | 8.4471 | 65.169 | 63.824 | - 1.3443 | 640 | 60 |
| 1173.9 | 1181.3 | 7.4254 | 54.569 | 55.091 | 0.5219 | 1180 | 60 |

5 结 论

本文基于双环型红外光源单摄像机系统,提出了一种视线方向检测方法.在眼部特征检测阶段,采用由粗及精的策略,先确定瞳孔潜在区域,再进行眼部特征的精细分割,有效抑制了由于头部随机运动和光源变化给亮暗瞳差分方案带来的不利影响.在视线参数到视线落点非线性映射模型建立阶段,将GRNN神经网络和非线性多项式模型相结合,避免了统计模型容易产生较大误差的问题,实现了单摄像机系统头动情况下较高精度的视线方向检测.实验结果及其在交互式图形界面系统中的应用验证了本文方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Technologies L C. Eyegaze systems[EB/OL]. <http://www.eyegaze.com>,2009-01-20.
- [2] Eyetech digital systems [EB/OL]. <http://www.eyetechds.com>, 2008-12-10.
- [3] Tobii Technology, Danderyd, Sweden[EB/OL]. <http://www.tobii.se>. 2008-12-10.
- [4] Applied science laboratories[Online]. <http://www.as-l.com>, 2008-12-10.
- [5] Ebisawa Y, Satoh S. Effectiveness of pupil area detection technique using two light sources and image difference method[C]. Proc of the 15th Annual Int Conf of the IEEE Engineer in Medicine and Biology Society. San Diego, 1993: 1268-1269.
- [6] Ebisawa Y. Improved video-based eye-gaze detection method[J]. IEEE Trans on Instrument, 1998, 47(2): 948-955.
- [7] Morimoto C H, Koons D, Amir A, et al. Pupil detection and tracking using multiple light sources[J]. Image Vision Computer, 2000, 18(4): 331-336.
- [8] Morimoto C, Flickner M. Real-time multiple face detection using active illumination[C]. Proc 4th IEEE Int Conf on Automatic Face and Gesture Recognition. Grenoble, 2000: 8-13.
- [9] Haro A, Flickner M, Essa I. Detecting and tracking eyes by using their physiological properties, dynamics and appearance [C]. Proc IEEE CVPR 2000. South Carolina, 2000: 1063-1069.
- [10] Ji Q, Yang X. Real time visual cues extraction for monitoring driver vigilance[C]. Proc Int Workshop on Computer Vision Systems. Vancouver, 2001: 107-124.
- [11] Zhu Z W, Fujimura K, Qiang J. Real-time eye detection and tracking under various light conditions [C]. Proc of ACM SIGCHI Symposium on Eye Tracking Research and Applications. New Orleans, 2002.
- [12] Zhu Z W, Qiang J. Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 38(1): 124-154.
- [13] Qing J. Real-time eye, gaze and face pose tracking for monitoring driver vigilance [J]. Real-Time Imaging, 2002, 8(5): 1077-2014.
- [14] Zhu Z, Ji Q. Eye and gaze tracking for interactive graphic display[J]. Machine Vision Application, 2004, 15(3): 139-148.
- [15] Kim S C. Non-intrusive eye gaze tracking under natural head movements[C]. Proc of the 26th Annual Int Conf of the IEEE. San Francisco, 2004: 2272-2273.
- [16] Qing J, Zhu Z W. Real-time nonintrusive monitoring and prediction of driver fatigue [J]. IEEE Trans on Vehicular, 2004, 53(4): 1060-1061.
- [17] Shih S W, Liu J. A novel approach to 3D gaze tracking using stereo cameras[J]. IEEE Trans of Systems, Man and Cybernetics, 2004, 34(1): 234-245.
- [18] Christian Hoffmann, Thao Dang, Christoph Stiller. Vehicle detection fusing 2D visual features[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium University of Parma. Parma, 2004, 7: 14-17.
- [9] 付梦印. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
(Fu M Y. Kalman filtering theory and Its application on navigation system[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [8] Jamshaid A, Fang J C. SINS/ ANS/ GPS integration using federated Kalman filter based on optimized information-sharing Coefficients [C]. AIAA. New York: NASA, 2005: 6028-6039.
- [9] 孙连霞, 穆荣军, 崔乃刚. 多传感器信息融合联邦滤波一般模型的理论及仿真研究[J]. 航空兵器, 2006, 4(8): 7-10.
(Sun L X, Mu R J, Cui N G. Theoretical and simulation study on general model of federated filtering with multi-sensor information fusion [J]. Aero Weaponry, 2006, 4(8): 7-10.)
- [10] 穆荣军, 崔乃刚. 多传感器分层多级变结构组合导航信息融合方法[J]. 上海航天, 2007, 1(1): 6-11.
(Mu R J, Cui N G. Hierarchical multistage and rescale information fusion method for multisensor integrated navigation[J]. Aerospace Shanghai, 2007, 1(1): 6-11.)

(上接第 1344 页)