

基于瞳孔空间形态的双眼视线跟踪方法

王向军^{1,2}, 白皓月^{1,2*}, 倪育博^{1,2}

¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

²天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 针对目前人眼视线跟踪的人机交互技术尚不成熟的现状,提出了一种基于立体视觉的瞳孔空间形态的桌面式双目视线跟踪方法。根据低灰度值分布初步定位瞳孔中心;利用瞳孔区域径向导数极坐标图提取瞳孔边缘点坐标,并使用随机样本一致性(RANSAC)对瞳孔边缘进行椭圆拟合;采用定向二进制简单描述符(Oriented brief, ORB)算法配准双目瞳孔边缘点坐标;通过双目立体视觉模型计算得到瞳孔边缘空间点坐标,最后采用最小二乘法计算瞳孔空间形态并解算出视线方向。实验结果表明,瞳孔中心定位速度达 300 frame/s,双眼视线跟踪速度达 15 frame/s,视线跟踪最大误差为 2.6°。本方法具有较好的准确性、稳健性、实时性,可应用于人眼视线跟踪的人机交互领域中。

关键词 机器视觉; 双目立体视觉; 视线跟踪; 瞳孔定位; 最小二乘法

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.023301

Two-Eye Gaze Tracking Based on Pupil Shape in Space

Wang Xiangjun^{1,2}, Bai Haoyue^{1,2*}, Ni Yubo^{1,2}

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the status of immaturity for the human-machine interaction technique of eye gaze tracking, a tabletop two-eye gaze tracking method is proposed based on pupil shape in space of stereo vision. With the low grey value distribution, the pupil center is located preliminarily. The radial derivative polar diagram in pupil area is used to extract the pupil edge point coordinates, and the random sample consensus (RANSAC) is used to fit the pupil edge with a suitable ellipse. The two-eye pupil edge point coordinates are matched using the ORB (Oriented brief) algorithm and the pupil edge point coordinates are obtained based on the two-eye stereo vision model. The least square method is finally adopted to calculate the pupil shape in space and the gaze direction is presented. The experimental results show that the positioning speed of pupil center is 300 frame/s, the two-eye gaze tracking speed is 15 frame/s, and the maximum gaze tracking error is 2.6°. It is verified that the proposed method has good accuracy, robustness and real-time performance, and it can be used in the field of human-machine interaction.

Key words machine vision; two-eye stereo vision; gaze tracking; pupil location; least square method

OCIS codes 330.1400; 100.4999; 150.1488

1 引言

眼动操作系统在人机交互领域应用日益广泛,但是通过人眼视线跟踪的人机交互技术尚不成熟^[1]。目前,眼动操作系统按硬件结构可以分为两种:头戴式系统^[2-3]与桌面式系统^[4]。本文中所建系统是一种基于立体视觉的瞳孔空间形态双目视线跟踪系统,具有严格的几何原理和理论依据,无需用户

校准即可直接进行视线跟踪。

瞳孔定位目前常用的方法有两种,一种是基于瞳孔形状的定位,如基于 Hough 圆拟合^[5-6]、轮廓跟踪^[7]等,这类方法由于需要对形状进行计算,通常计算量大,过程复杂,且在瞳孔被部分遮挡时定位困难,算法稳健性差;另一种是基于灰度统计的定位,如灰度直方图^[8]、二值化图均值统计^[9-10],该类方法运算速度快,但是阈值不容易划分,实用性较低。本文采

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-08-03; 录用日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(51575388)

* E-mail: shun344@qq.com

用基于低灰度值分布的瞳孔中心初步定位方法,该方法定位准确,计算速度快,且不需要设定准确的阈值。

目前常用的瞳孔边缘检测方法主要采用星射线法^[8,11]与椭圆拟合法^[9]相结合,但星射线法由于射线分散,检测结果容易受眼睑和睫毛的影响,本文从星射线法原理出发,采用基于瞳孔区域径向导数极坐标图的瞳孔边缘点检测方法,可以得到更为准确的结果。

本文搭建了基于双目立体视觉的桌面式双眼视线跟踪系统,改进了瞳孔定位及边缘检测算法,通过随机样本一致性(RANSAC)进行瞳孔椭圆拟合,均提高了系统的稳健性。本文定义“单只眼睛瞳孔边缘所构成的圆平面中心点法线方向”为视线方向,结合双目立体视觉模型^[12]与系统参数计算瞳孔空间信息,最终得到视线落点坐标。

2 基本原理

基于双目立体视觉的桌面式双眼视线跟踪,主要包括以下工作:1) 根据实际应用需求,搭建视线测量系统,并设置待检测区域;2) 对瞳孔中心粗定位,并检测瞳孔边缘点;3) 椭圆拟合瞳孔边缘点,配准瞳孔边缘特征点,求解瞳孔边缘点空间坐标;4) 基于最小二乘法拟合瞳孔平面方程,结合瞳孔中心点的世界坐标得到左右眼视线方向。

2.1 应用于视线跟踪的双目立体视觉系统

所建视线跟踪系统是在观察屏上安装双目摄像头构成光轴会聚模型布局,视线测量设备不与被试者接触,通过图像处理获取视线信息。镜头视场的选择由3个因素决定:1) 观察屏尺寸;2) 观察距离;3) 人脸宽度。系统结构如图1所示。

为获得高精度测量结果,双眼需在双目相机公共视场范围内,即每个相机都能看到完整的双眼。以脸宽 l_f 为双目相机实时拍摄区域长度,设置合适的观察

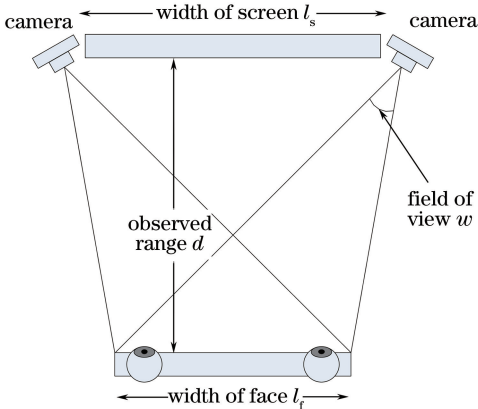


图1 双目立体视觉视线跟踪系统俯视图

Fig. 1 Top view of two-eye stereo vision system for gaze tracking

距离 d , 如果距离观察屏太近,则每个相机不能看到完整的双眼;如果距离观察屏太远,瞳孔在图像中占比变小,并且红外灯光线变弱,同样影响测量精度。假设双目基线距离为屏幕长度 l_s , 则相机视场角 ω 可表示为

$$\omega = \arctan \frac{4d \times l_f}{l_s^2 - l_f^2 + 4d^2}. \quad (1)$$

2.2 基于极坐标径向导数图的瞳孔特征点提取

由于相机位置固定,人眼只能在图像中的小范围内出现。在左右相机采集的图像中设置4个大小为 $W_{\text{eye}} \times H_{\text{eye}}$ 的感兴趣(ROI)区域,仅检测判断该区域中的瞳孔,可以省去繁杂的人脸检测以及人眼定位工作,提高处理效率。瞳孔中心的定位直接影响之后视线计算的准确性。分析瞳孔 ROI 区域,瞳孔、虹膜、眼睑灰度相差较大,由于瞳孔区域像素点灰度值普遍较低,因此,本研究通过统计灰度值来初步定位瞳孔中心坐标,再根据灰度值较低点的分布情况,剔除异常值点,最终得到瞳孔中心坐标。

对眼睛 ROI 区域降采样以提高后续处理速度,采用高斯滤波器去噪,对处理后的图像进行灰度统计,得到 k 级灰度值点的数量 n_k 以及坐标集合。由于瞳孔的灰度值较小,所以从灰度值最小的点开始统计,设定点数上限 p_{max} , 避免点数过多影响计算效率。统计的点数 p 满足

$$p = \sum_{k=i+1}^j n_k, \sum_{k=0}^i n_k = 0, \sum_{k=i+1}^{j-1} n_k \leq \sum_{k=i+1}^j n_k \leq p_{\text{max}}, \quad (2)$$

计算所统计的每个点 (x_m, y_m) 与统计中心点 (\bar{x}, \bar{y}) 欧式距离 d_m 的均值 $E(d)$ 与方差 $D(d)$, $m = 0, 1, \dots, p-1$, 满足

$$E(d) - \frac{D(d)}{2} < d_m < E(d) + \frac{D(d)}{2} \quad (3)$$

的点进行保留并计数,得到最终的点数 p' 与点集合 (x'_m, y'_m) , $m = 0, 1, \dots, p'-1$, 认为该集合中心点 (\bar{x}', \bar{y}') 为瞳孔中心。

准确定位瞳孔中心 (\bar{x}', \bar{y}') 后,以该点为中心重新定位获得瞳孔的 ROI 区域,瞳孔大小为 $W_{\text{pupil}} \times H_{\text{pupil}}$ 。分析 ROI 区域的径向导数发现,瞳孔边缘点是径向边缘的一部分。对该 ROI 区域进行极坐标变换,最后得到极坐标径向导数图,图中每列像素最大值可能为瞳孔边缘点。

但由于角膜表面具有反射性,850 nm 红外光可能会产生镜面反射。为避免这一现象,设定一个反射阈值 t , 剔除极坐标径向导数图与极坐标图中最大值大于阈值的列;根据眼睑、虹膜与瞳孔的灰度差异可

以剔除极坐标变换图中眼睑遮挡瞳孔的部分。

2.3 基于定向二进制简单描述符 (ORB) 与 RANSAC 算法的瞳孔二维特征点配准

双目相机拍摄的均是离轴瞳孔图像,瞳孔边缘呈椭圆形态。由于提取到的瞳孔边缘点可能包含异常值,最小二乘法椭圆拟合会尽量适应包含局外点在内的所有点,不能找到适应于局内点的椭圆。为了处理这些异常值,本文采用 RANSAC 方法进行椭圆方程拟合,该方法能得到仅用局内点计算的结果,极大地提高了稳健性。

采用 RANSAC 拟合瞳孔的步骤如下:

1) 在瞳孔边缘点提取 N 个点,从中随机选出 n 个样本点;

2) 通过 n 个样本点拟合估计得到椭圆参数,根据拟合参数进行初步筛选,若不满足半径或者宽高比约束,筛选不通过,返回步骤 1)。结合瞳孔 ROI 区域的 sobel 边缘处理结果,与瞳孔图像梯度匹配,如果匹配失败,返回步骤 1);

3) 假设样本点是唯一内点,通过迭代查找内点,重新拟合椭圆;

4) 结合瞳孔 ROI 区域的 sobel 边缘处理结果对进一步拟合的结果进行椭圆拟合优度评价并更新最终拟合结果。如果循环次数未达到 m 次,返回步骤 1)。

通过以上方法最终使椭圆方程系数(a, b, c, d, e, f)满足

$$au^2 + buv + cv^2 + du + ev + f = 0, \quad (4)$$

由椭圆方程可计算椭圆中心坐标,作为最终的瞳孔中心点坐标(x_{p0}, y_{p0}),公式为

$$x_{p0} = (be - 2cd)/(4ac - b^2), \quad (5)$$

$$y_{p0} = (bd - 2ae)/(4ac - b^2)。 \quad (6)$$

在匹配左右相机的瞳孔特征点时,旋转不变性变得更为重要,而尺度不变性则可以忽略。由于 ORB 算法比尺度不变特征变换(SIFT)算法与加速稳健特征(SURF)算法速度快得多,考虑到实时性需求,本研

究利用拟合得到的椭圆方程,均匀地计算出椭圆上点的坐标作为瞳孔特征点,采用 ORB 中的 BRIEF 算法得到特征描述子,结合 RANSAC 进行配准,最终得到配准后的左右瞳孔边缘点的图像坐标集合。

2.4 基于瞳孔空间形态的视线方向计算

对左右相机分别标定得到高精度内参,利用标定得到的畸变系数进行畸变校正,再联合标定得到左右相机的外参,以便进行后续空间点求解。

根据透视模型,双目立体视觉视线跟踪系统的成像方程为

$$z_{cl} \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_l \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} f_{x_l} & 0 & u_{0l} \\ 0 & f_{y_l} & v_{0l} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l & \mathbf{T}_l \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$z_{cr} \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_r \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} f_{x_r} & 0 & u_{0r} \\ 0 & f_{y_r} & v_{0r} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{T}_r \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $\mathbf{M}_l, \mathbf{M}_r$ 分别为左右相机的投影矩阵; z_{cl}, z_{cr} 分别为被测瞳孔点 P 在摄像机坐标系 z 方向坐标; u_l, v_l 为被测瞳孔点 P 在左相机像面上的投影坐标; f_{x_l}, f_{y_l} 为左相机的焦距; u_{0l}, v_{0l} 为左相机像面中心坐标; u_r, v_r 为 P 在右相机像面上投影坐标; f_{x_r}, f_{y_r} 为右相机的焦距; u_{0r}, v_{0r} 为右相机像面中心坐标; $\mathbf{R}_l, \mathbf{R}_r$ 分别为左右相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵; $\mathbf{T}_l, \mathbf{T}_r$ 分别为左右相机坐标系相对于世界坐标系的平移变换矢量。

采用最小二乘法求解

$$\begin{aligned} & [u_l \mathbf{M}_l(3,1) - \mathbf{M}_l(1,1)]X_p + [u_l \mathbf{M}_l(3,2) - \mathbf{M}_l(1,2)]Y_p + [u_l \mathbf{M}_l(3,3) - \mathbf{M}_l(1,3)]Z_p = \\ & \quad \mathbf{M}_l(1,4) - u_l \mathbf{M}_l(3,4) \\ & [v_l \mathbf{M}_l(3,1) - \mathbf{M}_l(2,1)]X_p + [v_l \mathbf{M}_l(3,1) - \mathbf{M}_l(2,2)]Y_p + [v_l \mathbf{M}_l(3,3) - \mathbf{M}_l(2,3)]Z_p = \\ & \quad \mathbf{M}_l(2,4) - v_l \mathbf{M}_l(3,4) \\ & [u_r \mathbf{M}_r(3,1) - \mathbf{M}_r(1,1)]X_p + [u_r \mathbf{M}_r(3,1) - \mathbf{M}_r(1,2)]Y_p + [u_r \mathbf{M}_r(3,3) - \mathbf{M}_r(1,3)]Z_p = \\ & \quad \mathbf{M}_r(1,4) - u_r \mathbf{M}_r(3,4) \\ & [v_r \mathbf{M}_r(3,1) - \mathbf{M}_r(2,1)]X_p + [v_r \mathbf{M}_r(3,1) - \mathbf{M}_r(2,2)]Y_p + [v_r \mathbf{M}_r(3,3) - \mathbf{M}_r(2,3)]Z_p = \\ & \quad \mathbf{M}_r(2,4) - v_r \mathbf{M}_r(3,4) \end{aligned}, \quad (9)$$

可以得到瞳孔边缘点的空间坐标 (X_p, Y_p, Z_p) 与瞳孔中心的空间坐标 (X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0}) 。

定义单只眼睛瞳孔边缘所构成的圆平面中心点法线方向为视线方向,则视线方向的跟踪需要已知瞳孔中心空间坐标及瞳孔边缘构成的圆平面的方程。使用最小二乘法对瞳孔边缘点 (X_p, Y_p, Z_p) 的空间点坐标拟合,其拟合表达式为

$$AX_p + BY_p + CZ_p + D = 0. \quad (10)$$

确定平面方程系数 (A, B, C, D) ,得到瞳孔所在平面方程。结合双目立体视觉测量模型计算瞳孔中心的空间坐标 (X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0}) ,则过瞳孔中心的法线表达式即视线方向为

$$\frac{X_p - X_{p0}}{A} = \frac{Y_p - Y_{p0}}{B} = \frac{Z_p - Z_{p0}}{C}. \quad (11)$$

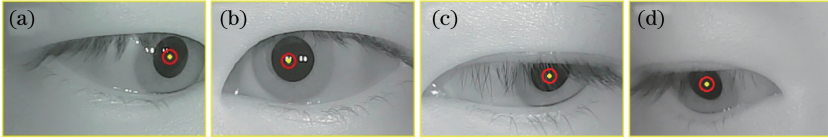


图2 瞳孔中心定位。(a)(b)无遮挡;(c)(d)有遮挡

Fig. 2 Positioning of pupil center. (a) (b) Without occlusion; (c) (d) with occlusion

由图2可知,该方法在瞳孔受到眼睑、睫毛部分遮挡时,仍可准确定位瞳孔中心位置,具有较高的稳健性,检测帧率可达300 frame/s,远优于文献[4]的方法,与文献[7]检测速度相近。

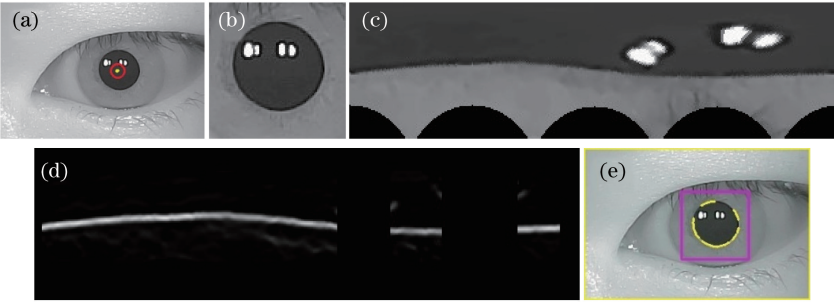


图3 瞳孔边缘检测图。(a)眼睛区域;(b)瞳孔区域;(c)瞳孔极坐标图;(d)瞳孔径向导数图;(e)检测结果

Fig. 3 Detection of pupil edge. (a) Eye area; (b) pupil area; (c) polar diagram of pupil;

(d) radial derivative of pupil; (e) detection result

本文方法与文献[8]、[11]中所采用的星射线法相比,提高了边缘提取准确度及边缘点提取数量,具有更高的稳健性。该方法与canny类边缘检测瞳孔的方法不同,可以在不同的眼睛外观、不同用户与光照条件下均保持稳定,并且由于不需要很强的边缘,还可以支持离焦距图像,非常适合实际应用。

3.2 瞳孔边缘点椭圆拟合与配准实验

通过英特尔 Thread Building Blocks 库进行并

3 实验验证

采用带有850 nm窄波段滤光片的CMOS摄像头,且每个摄像头配有6颗近红外照明灯,最大分辨率为1280 pixel×960 pixel,帧率为30 frame/s。观察屏点距为0.2745 mm,屏幕尺寸为160 mm×120 mm,即屏幕长度 l_s 为160 mm。根据人脸参数,设置脸宽大小 l_f 为150 mm,观察距离 d 为180 mm,可得 $\omega = 39^\circ$,最终选择8.0 mm,视场角为 42° 的镜头。

3.1 瞳孔中心定位与边缘点提取实验

设置定位ROI区域大小 $W_{eye} = 300, H_{eye} = 200$,设定点数数量上限 p_{max} ,实验结果如图2所示,红圈黄点为定位到的瞳孔中心。

设置瞳孔定位ROI区域大小 $W_{pupil} = 90, H_{pupil} = 90$,反射阈值 $t = 250$,实验结果如图3所示,紫色框为瞳孔定位ROI区域,黄点为检测到的瞳孔边缘点。

行运算加速RANSAC迭代过程,设定固定的迭代次数 $c = 10$ 。实验结果如图4所示,绿色为拟合的椭圆结果。

可以看到,本文方法在不同光照下能准确地拟合出瞳孔,瞳孔在无红外灯时变大,但是瞳孔边缘异常值增多,影响后续的视线跟踪检测精度。

在拟合得到的椭圆方程上每隔 2° 进行采样,得到每4组180个特征点的集合,使用ORB结合RANSAC算法进行配准,结果如图5所示。

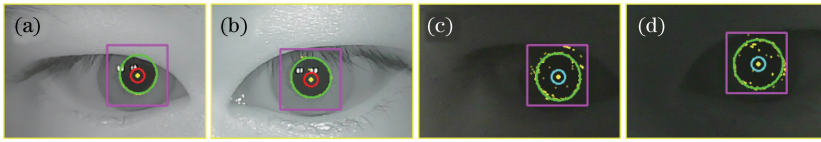


图 4 瞳孔边缘检测图。(a)(b)有近红外照明;(c)(d)无近红外照明

Fig. 4 Detection of pupil edge. (a)(b) With near-infrared lighting; (c)(d) without near-infrared lighting

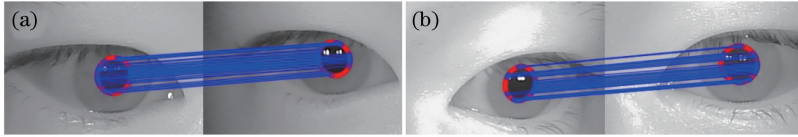


图 5 瞳孔边缘配准图。(a)左眼;(b)右眼

Fig. 5 Feature matching of pupil edge. (a) Left eye; (b) right eye

3.3 视线落点误差分析

使用 LGP070-18×18 棋盘格标定左右相机,由 5 位测试者分别注视屏幕测试靶标图中的 24 个红

色测试点,记录每个点左右视线落点 z 的坐标,左眼落点位置为绿色,右眼落点位置为紫色,蓝圈为左右相机的位置。测试结果如图 6 所示。

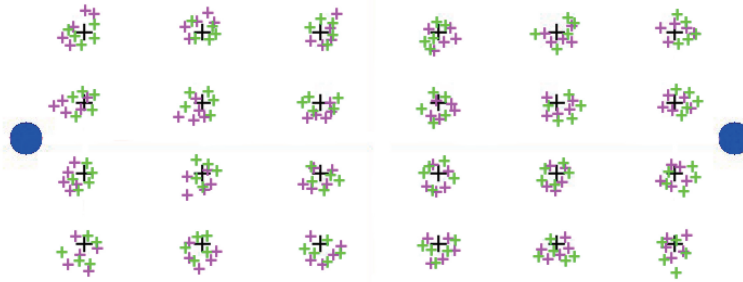


图 6 视线落点测试图

Fig. 6 Test of gaze points

以视线落点数据与测试点的欧式距离作为跟踪误差,左右眼视线平均跟踪误差见表 1 和表 2。

表 1 左眼视线落点检测误差

Table 1 Detection errors of gaze points for

Coordinate	left eye						pixel
	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	
Row 1	4.3	5.0	6.2	9.4	11.2	13.1	
Row 2	2.9	4.5	5.8	8.5	10.8	11.7	
Row 3	3.2	4.3	5.5	8.7	11.5	12.2	
Row 4	4.7	5.7	5.6	10.0	12.4	14.1	

表 2 右眼视线落点检测误差

Table 2 Detection errors of gaze points for

Coordinate	right eye						pixel
	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	
Row 1	12.1	13.6	9.4	8.3	6.0	5.0	
Row 2	11.7	11.8	8.5	6.8	5.5	4.3	
Row 3	11.2	12.5	8.7	6.7	4.3	4.1	
Row 4	15.1	14.4	10.2	9.9	6.8	6.7	

对左右眼的视线落点误差进行对比发现,左眼落点误差在测试靶标图左侧的误差明显低于右侧,右眼落点误差在测试靶标图右侧的误差明显低于左

侧。原因总结如下:观察靶标左侧时,右眼瞳孔容易被眼睑遮挡;观察靶标右侧时,左眼瞳孔容易被眼睑遮挡,最后导致测量精度降低,因此可以根据左右点落点位置,分配不同的权重,得到最终的观察点。根据观察屏点距,以最大落点误差计算可得到视线检测最大误差为 2.6° 。

4 结 论

提出基于双目立体视觉的桌面式双眼视线跟踪方法,与目前头戴式单、双目单眼视线跟踪相比,无须使用者佩戴实验设备,可以实时测量双眼视线落点,降低了检测成本,具有更高的稳定性;与现有桌面视线跟踪方法相比,该方法无须对每个使用者进行标定,简化了使用流程。基于 3D 视线检测模型,改进了瞳孔定位算法,采用瞳孔区域径向导数极坐标图提取瞳孔边缘点,通过 RANSAC 进行瞳孔椭圆拟合,均提高了跟踪的稳健性。结合双目立体视觉模型与系统参数,得到视线落点坐标,双眼跟踪速度达到 15 frame/s。针对本文提出的方法,通过测试者验证实验,进行了误差分析,验证了本文方法的

有效性与可行性,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0215001.
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0215001.
- [2] Wang X J, Cai F F, Liu F, *et al.* Non-contact dynamic real-time eye tracking technology [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2015, 9(3): 266-278.
王向军, 蔡方方, 刘峰, 等. 非接触动态实时视线跟踪技术[J]. *计算机科学与探索*, 2015, 9(3): 266-278.
- [3] Hou S W, Li B, Xia X B. One-point calibration method for head-mounted eye tracking system [J]. *Computer Applications & Software*, 2014, 31(9): 152-156.
侯树卫, 李斌, 夏小宝. 头戴式视线跟踪系统的一点标定方法[J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(9): 152-156.
- [4] Wood E, Bulling A. EyeTab: Model-based gaze estimation on unmodified tablet computers [C] // *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications-ETRA'14*, March 26-28, 2014, Safety Harbor, Florida. New York: ACM, 2014: 207-210.
- [5] Zhang H M, Luo P Y, Sui J F. Research on pupil size detection algorithm based on image processing [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(1): 136-141.
张慧敏, 罗珮允, 隋建峰. 基于图像处理的瞳孔大小检测算法研究[J]. *半导体光电*, 2017, 38(1): 136-141.
- [6] Mao S B. Exact pupil detection algorithm combining Hough transformation and contour matching [J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(5): 1415-1420.
毛顺兵. Hough变换和轮廓匹配相结合的瞳孔精确检测算法[J]. *计算机应用*, 2016, 36(5): 1415-1420.
- [7] Gu K K, Fu W W, Dong Y F, *et al.* Rapid pupil detection based on improved contour tracking [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(6): 574-578.
顾可可, 付威威, 董月芳, 等. 基于改进轮廓跟踪的瞳孔快速检测[J]. *红外技术*, 2017, 39(6): 574-578.
- [8] Jiang T P, Wang X F, Pan X, *et al.* Method of improved exact pupil measurement based on face image [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2018, 39(4): 842-846.
姜太平, 汪小帆, 潘祥, 等. 一种改进的基于人脸图像的瞳孔精确检测方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2018, 39(4): 842-846.
- [9] Chen J, Zheng S H, Pan L, *et al.* Pupil detection method based on ellipse fitting and parameter passing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1890-1899.
陈健, 郑绍华, 潘林, 等. 结合椭圆拟合与参数传递的瞳孔检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1890-1899.
- [10] Liu R A, Jin S J, Li W Q, *et al.* Subpixel edge detection and center localization of the pupil [J]. *Computer Engineering & Applications*, 2007, 43(5): 200-203.
刘瑞安, 靳世久, 李文清, 等. 瞳孔亚像素边缘检测与中心定位[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(5): 200-203.
- [11] Xia X B, Li B. A two-level pupil location method relying on 3D eyeball model[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2014, 44(2): 153-159.
夏小宝, 李斌. 一种依赖3D眼球模型的两级瞳孔定位算法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2014, 44(2): 153-159.
- [12] Liu Y Y, Feng P, Long Z R, *et al.* Research and implementation of binocular location system based on region of interest segmentation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051102.
刘远远, 冯鹏, 龙邹荣, 等. 基于靶标区域分割的双目定位系统研究与实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051102.
- [13] Wen Q C, Da F P, Fang X. Calibration for gaze tracking system based on binocular stereo vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1015002.
温晴川, 达飞鹏, 方旭. 基于双目立体视觉的视线跟踪系统标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1015002.
- [14] Wu Q Y, Zeng Z, Zhang B C, *et al.* A 360° three-dimensional measurement system and its calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404002.
吴庆阳, 曾增, 张佰春, 等. 一种新的360°三维测量系统及标定技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0404002.