

一种可克服头动影响的视线跟踪系统

秦华标, 严伟洪, 王信亮, 余翔宇

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

摘 要: 本文提出一种基于单目摄像头和四红外光源的视线跟踪系统. 通过四个红外光源在眼睛角膜上产生的四个光斑的中心与瞳孔中心建立新型的瞳孔角膜反射向量, 该向量对头部运动具有较好的鲁棒性; 此外通过设定感兴趣区域提高人眼定位速度, 利用模板匹配与凸包方法精确定位瞳孔中心, 并采用点匹配法正确识别光斑中心, 确保了视线跟踪的实时性和精度. 实验结果证明该系统较好地解决了视线跟踪精度不高和头部运动受限的问题, 并且满足实时性要求.

关键词: 视线跟踪; 头部运动; 瞳孔; 瞳孔角膜反射向量

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 12-2403-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.013

A Gaze Tracking System Overcoming Influences of Head Movements

QIN Hua-biao, YAN Wei-hong, WANG Xin-liang, YU Xiang-yu

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: A gaze tracking system based on single camera and four IR light sources is proposed in this paper. With pupil's center and four reflection centers on corneal generated from the IR light sources, a novel pupil-corneal reflection vector is constructed, which is invariant to head movements. In addition, the region of interest is applied to improve the speed of eye location; template matching and convex hull are used to locate pupil's center; point matching is used to identify the reflection centers. These methods guarantee the real-time performance and accuracy of the gaze tracking. The experiment results demonstrate the improved accuracy and the real-time performance of the system with less constraint on head movements.

Key words: gaze tracking; head movements; pupil; pupil-corneal reflection vector

1 引言

人类获取的信息大部分来源于视觉, 同时眼神也反映了人们的目的与意图. 通过眼动特征判断人眼注视点或视线方向的视线跟踪技术, 其研究成果在人机交互、虚拟现实、医疗等领域有着广泛的应用前景. 近年来视线跟踪技术发展迅速, 衍生出了多种不同的视线跟踪技术^[1]. 相对于二维的视线跟踪方法, 三维的方法^[2~4]虽能克服头部运动, 但对硬件有很高的要求, 且需要进行较多的标定, 难于实际应用. 在二维视线跟踪方法中, 瞳孔角膜反射向量技术^[5,6]由于其简单且具有较好的准确性, 成为了基于摄像的视线跟踪系统中常用的方法.

传统的角膜反射向量法^[7]利用了单个角膜反射点作为参考点. 当头部运动时, 角膜反射斑点不再是静止的参考点, 从而导致注视点的估计准确性迅速降低. 为了解决该问题, Cerrolaza 等人^[8]采用两个红外光源, 利

用两个反射光斑的相对距离对瞳孔角膜反射向量进行标准化; Hennessey 和 Lawrence^[9]利用四个红外光源产生的角膜反射光斑所形成四边形的面积与标定时所形成的面积的比值, 将瞳孔角膜反射向量调整回标定时的大小.

国内的视线跟踪研究大多也是基于瞳孔角膜反射向量技术的. 文献[10]通过大量训练数据建立单目摄像头下的二维面部信息与三维头部姿势信息之间的映射关系, 从而补偿头部运动带来的影响, 但是从低维信息向高维信息拓展必然引入更多的估计误差, 难以保证头部运动的补偿效果. 文献[11]则是利用神经网络来补偿头部运动影响, 但神经网络需要针对不同的个体进行大量的训练, 不易实际应用.

2 视线跟踪系统的硬件配置

综上所述, 为改进角膜反射向量法同时避免使用复

杂的头部运动补偿模型,本文提出了一种对头部运动具有鲁棒性的瞳孔角膜反射向量并构建对应的视线跟踪系统.如图1所示,系统需要一个摄像头和四个红外LED光源,摄像头放置在屏幕正下方,四个LED光源分别固定在屏幕的四个角上.由于四个LED红外光源分布在显示屏的四个角上,摄像机将会拍摄到角膜上含有四个反射光斑的眼睛图像,如图2所示.

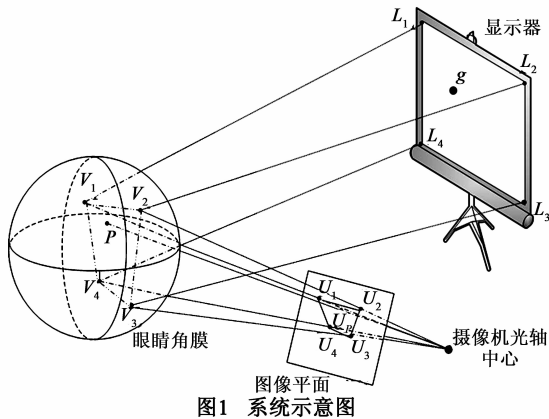


图1 系统示意图



图2 眼睛图像

3 瞳孔角膜反射向量的构成

在图1中,点(V_1, V_2, V_3, V_4)和 P 分别是红外LED光源(L_1, L_2, L_3, L_4)在眼睛角膜上产生的反射斑点及眼睛瞳孔中心,这些点将会被摄像机捕捉为图像平面上的角膜反射光斑和瞳孔中心(U_1, U_2, U_3, U_4, U_p).由于眼睛的几何结构特性和红外LED光源的空间布置,可以把(U_1, U_2, U_3, U_4)连在一起构成一个多边形,如果眼睛注视屏幕时,瞳孔中心 U_p 必将在多边形里面或者附近.当注视点位置 g 在屏幕上移动时,瞳孔中心 U_p 与四个反射光斑的相对位置也会相应地产生变化.因此图像上的(U_1, U_2, U_3, U_4, U_p)与屏幕上的(L_1, L_2, L_3, L_4, g)必然有一定相关性,可以用来计算屏幕上注视点位置.

通过实验观察到:如图3所示,当用户在头部保持静止的情况下注视与屏幕竖直边平行的线上的一系列点($G_{y1}, G_{y2}, \dots, G_{yn}$)时,可以在图像平面上获得与注视点相对应的瞳孔中心($U_{py1}, U_{py2}, \dots, U_{pyn}$),而且这些瞳孔中心点也能近似地拟合成一条直线 S_y .并且当头部

保持静止时,由于四个红外光源和摄像头的位置也是固定的,所以在图像平面上形成的四个角膜反射斑点(U_1, U_2, U_3, U_4)位置也是固定的.直线 S_y 会分别与直线 S_{12} 和 S_{34} 相交于点 A 和点 C ,其中 S_{12} 表示过点 U_1 和点 U_2 的直线, S_{34} 表示过点 U_3 和点 U_4 的直线,下文依此类推.通过计算,发现 $I_{1A}/I_{12} = I_{4C}/I_{43}$,其比值记为 R_x ,其中, I_{1A} 表示点 U_1 指向点 A 的向量, I_{12} 表示点 U_1 指向点 U_2 的向量,同理 I_{4C} 表示点 U_4 指向点 C 的向量、 I_{43} 表示点 U_4 指向点 U_3 的向量,下文依此类推.甚至当头部位置和头部姿势在一定范围内变化时,只要用户注视同一系列点时,所形成的 I_{1A}/I_{12} 与 I_{4C}/I_{43} 仍然相等,且近似等于 R_x .

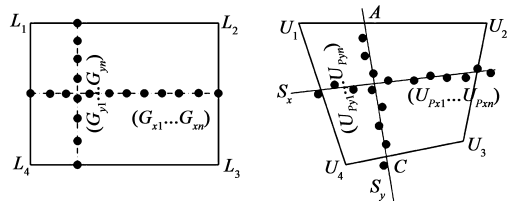
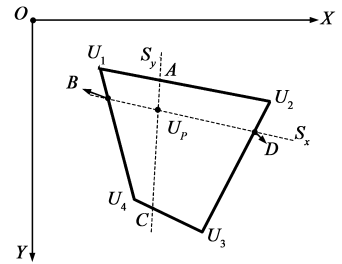


图3 屏幕上注视点与图像上瞳孔中心关系图

相似地,当用户注视与屏幕水平边平行线的一系列点($G_{x1}, G_{x2}, \dots, G_{xn}$)时,可以在图像平面上获得与注视点相对应的瞳孔中心($U_{px1}, U_{px2}, \dots, U_{pxn}$),而且这些点也能近似地



拟合成一条直线 S_x ,直线 S_x 分别与直线 S_{14} 和 S_{23} 相交于点 B 和点 D .通过计算,发现 $I_{1B}/I_{14} = I_{2D}/I_{23}$,且该比值记为 R_y ,其数值基本稳定.

通过以上的分析,为了减少头部运动产生的影响,本文提出一种新的瞳孔角膜反射向量(R_x, R_y).首先求瞳孔角膜反射向量的横坐标部分 R_x .如图4所示,画一条经过瞳孔中心 U_p 的直线 S_y ,与直线 S_{12} 和 S_{34} 相交于点 A 和点 C ,并且使得:

$$R_x = I_{1A}/I_{12} = I_{4C}/I_{43} \quad (1)$$

R_x 为瞳孔角膜反射向量的横坐标部分.

同理,画一条经过瞳孔中心 U_p 的直线 S_x ,分别与直线 S_{14} 和直线 S_{23} 相交于点 B 和点 D .其中:

$$R_y = I_{1B}/I_{14} = I_{2D}/I_{23} \quad (2)$$

R_y 为瞳孔角膜反射向量的纵坐标部分.

4 映射函数选取与标定

在提取到瞳孔角膜反射向量(R_x, R_y)后,首先选取二次多项式作为初始映射函数,再根据逐步线性回

归^[12]剔除非显著参数项,最终得到拟合度最佳的多项式映射函数:

$$g_x = a_0 + a_1 R_x + a_2 R_y + a_3 R_x R_y + a_4 R_x^2 \quad (3)$$

$$g_y = b_0 + b_1 R_x + b_2 R_y + b_3 R_x R_y + b_4 R_y^2 \quad (4)$$

其中, (g_x, g_y) 为注视点, $a_i, b_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ 为待标定参数. 标定点为屏幕的中点以及均匀分布在屏幕上的 2×2 的 4 个点, 总共 5 个点, 标定时, 眼睛依次注视五个标定点同时提取相应的瞳孔角膜反射向量, 计算出参数 $a_i, b_i (i = 0, 1, \dots, 4)$. 标定好的映射函数用于实时的计算注视点的位置.

5 特征提取

5.1 人眼定位

人眼定位是特征提取的前提. 在本文中, 如果上一帧图像没有提取到瞳孔中心位置信息, 那么采用由 Paul Viola^[13]提出的分类器方法来检测人眼. 如果在上一帧图像中已经有效地提取到了瞳孔中心的位置信息, 那么在处理当前帧图像时, 会直接以上一帧图像的瞳孔中心的位置信息设置感兴趣区域(ROI)作为人眼区域, 而不再使用分类器进行人眼定位, 由此可以大大提高特征信息提取速度.

5.2 瞳孔中心定位

(1) 二值化模板匹配瞳孔区域定位

为了突出瞳孔黑块, 对人眼区域进行二值化处理, 处理后的图像如图 5(a) 所示, 经二值化后, 瞳孔黑块得到了明显的强化, 选择背景为白色中间为一黑圆块的黑白图像作为通用匹配模板(如图 5(b) 所示)进行瞳孔区域模板匹配定位.

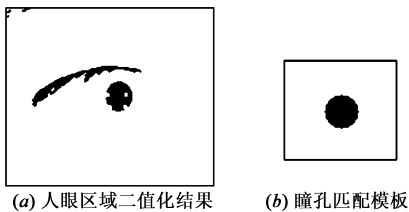


图5 瞳孔定位预处理图

(2) 二值化提取轮廓及凸包

当定位出瞳孔区域后, 即可提取瞳孔轮廓. 如图 6(a) 所示, 当反射斑点位于瞳孔边界时, 瞳孔的轮廓会在反射斑点位置上出现明显的凹陷. 如果直接对该轮廓进行椭圆拟合, 则必然会产生比较大的误差. 为了解决这个问题, 当提取到瞳孔轮廓后本文通过 Graham's Scan 法^[14]求解瞳孔轮廓凸包点来去除凹陷的点, 如图 6(b) 所示.

(3) 椭圆拟合瞳孔轮廓

瞳孔轮廓凸包后得到的凸包点绝大部分都为瞳孔

真正的轮廓点, 因瞳孔在图像平面的轮廓上为一椭圆, 所以对所提取的瞳孔轮廓的凸包点进行最小二乘法椭圆拟合以定位瞳孔中心, 结果如图 6(c) 所示.

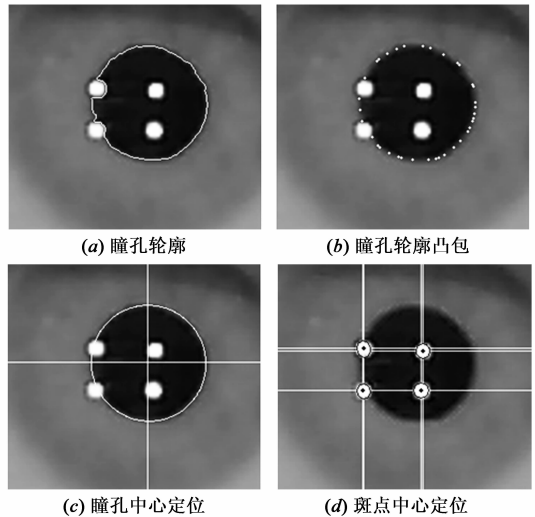


图6 特征提取结果图

5.3 斑点中心定位

(1) 二值化获得候选斑点轮廓

反射斑点是由红外光源在角膜上反射产生的, 在眼睛图像上是一个高亮的斑块. 首先对图像进行二值化, 通过斑点区域大小的检查以去除由于噪声而引起的干扰点, 然后基于角膜反射斑点离瞳孔中心最近这个原则, 选择离瞳孔中心最近的若干白色的区域作为候选点并寻找它们的轮廓, 从而排除由眼角点、皮肤高亮点等引起的干扰点.

(2) 椭圆拟合

由于红外光源近似为点光源, 所以在眼睛角膜上的反射斑点为椭圆光斑, 因此候选反射点的轮廓被拟合为椭圆以获取候选斑点的中心.

(3) 斑点匹配

在得到候选斑点中心后, 当眼睛偏转太大时, 反射光斑可能会出现于角膜和巩膜边界上或直接落在巩膜上. 当反射光斑出现在角膜和巩膜边界时, 由于角膜的球体半径与巩膜的球体半径以及折射率不同, 光斑就会出现扭曲失真, 而当反射光斑直接落在巩膜上时, 由于巩膜表面比较粗糙, 又会导致反射光斑消失或者产生虚假的反射光斑.

因此为了正确识别反射光斑, 本文采用点模式匹配的方法^[9]. 首先在没发生斑点畸变或丢失的帧中提取四个斑点作为参考点, 在后续的每一帧图像特征提取过程中把提取到的光斑作为候选光斑, 再根据点模式匹配算法, 找出对应于各个参考点的有效光斑. 如果有效光斑中心不足 4 个且不少于 2 个时, 利用参考光斑

中心与对应有效光斑中心的平移旋转关系,即可求得丢失的有效光斑中心,完成合法的光斑中心定位与识别.此外由于红外光源的摆放位置,有效光斑数少于两个的情况极少出现,若出现这种情况则丢弃该帧图像.光斑中心定位结果如图 6(d)所示.

6 实验结果对比

为了评估以上提出的方法,建立了一个视线跟踪系统,随机选取 20 个受试者分别进行实验.所使用的电脑是 Pentium Dual-Core-1.7GHz 系统,4GB 内存,配有 17 英寸液晶显示屏,分辨率为 1280×1024 像素.采用的近红外 CCD 摄像头分辨率为 640×480 像素.所有的测试均在白天室内环境下进行,光照条件为自然光、日光灯,无其他强光干扰.

实验首先从受试者的标定为开始.在标定过程中,受试者的右眼距离显示屏 550mm,摄像头朝向于受试者的右眼.限于系统摄像头视野与焦距问题,标定完后,本文只测试了头部在以标定位置为中心的 ($16\text{cm} \times 10\text{cm} \times 14\text{cm}$) 空间中的 27 个不同位置下的数据,每次均测试显示屏上一组按 8×8 平均分布的 64 个测试点.实验中测得本系统每秒可以处理 60 帧眼睛图像,满足实时性要求.

将本文算法的精度与传统的角膜反射向量^[7]、标

准化的角膜反射向量^[8]、增强的角膜反射向量^[9]三种方法的精度对比,其结果如表 1 所示,其中标定位置为 $\text{depth} = 550\text{mm}$, $\text{height} = 0\text{mm}$, $\text{width} = 0\text{mm}$.眼睛到屏幕中心距离 550mm,面部所在平面平行于屏幕,测试时分别沿着深度 depth 方向前后移动 80mm、沿着 height 方向上下移动 50mm 以及沿着 width 方向左右移动 70mm.在标定位置上,四种瞳孔角膜反射向量法的平均误差分别是 5.4mm, 5.4mm, 5.3mm 和 5.5mm,它们的精度并无显著区别,在 $(0.5^\circ \sim 0.6^\circ)$ 之间.但是当头偏离标定位置时,这四种瞳孔角膜反射向量性能的差异非常明显.当头部向前或者向后运动 80mm 时,传统的瞳孔角膜反射向量法的精度将分别下降到 54.8mm 和 40mm.标准化的瞳孔角膜反射向量法虽然能更好的容许头部运动,但其精度也分别下降到 13.7mm 和 12.9mm.增强型的瞳孔角膜反射向量法比前两种方法的性能更好,但是它也有精度下降的问题.另外头部运动不只在深度方向上,当头部在三个维度的多个位置移动时,四种瞳孔角膜反射向量法的平均误差分别是 38.8mm, 17.6mm, 11.9mm 和 9.8mm.其中本文的瞳孔角膜反射向量的精度是最高的,具有最好的克服头部运动的能力,该方法比次优的增强型方法的精度平均要高出 17.6%

表 1 不同角膜反射向量方法的对比(单位:mm)

瞳孔角膜反射向量		平均误差											
		文献[7]			文献[8]			文献[9]			本文方法		
width		-70	0	70	-70	0	70	-70	0	70	-70	0	70
depth = 470	height = -50	75.4	77.9	88.5	24.7	12.4	21.4	12.3	14.8	19	10.5	12.7	15.1
	height = 0	52.5	54.8	61.5	20.1	13.7	25.9	13.1	10.2	15.3	8.1	9.7	12.6
	height = 50	32.1	35	38	19.3	19.5	30	13.6	9.8	12.2	9	9.3	11.4
depth = 550	height = -50	20.6	19.9	27.2	21	8.1	16.8	10.8	7.6	13.5	8.8	7.4	9.3
	height = 0	12.4	5.4	13.5	15.6	5.4	18.7	11.2	5.3	10.9	7.6	5.5	6.7
	height = 50	23.2	15	17.2	12.1	9	22.3	13.6	7.5	10	10.4	6.7	7.2
depth = 630	height = -50	31.9	29	31.2	23.5	17.8	22	12.9	9.1	11.6	11.8	9	7.9
	height = 0	43.5	40	40.4	17.7	12.9	20.1	14.4	9.2	10.6	12.8	9.3	7.4
	height = 50	56.3	53.1	52.8	12.9	10.7	21.2	17.8	12.4	11.5	15.7	11.9	9.6

在与本具有相似硬件结构的系统中,DH Yoo 等人^[15]认为 (L_1, L_2, L_3, L_4, g) 形成的交比与 $(U_1, U_2, U_3, U_4, U_p)$ 形成的交比是相等的,并以此来求解人眼注视点.然后 DH Yoo 和 MJ Chung^[16]又对此方法做了改进,提出了与眼睛角膜表面相切的虚平面的概念,认为屏幕上的点与虚拟平面上的点间的交比不变.后来 Coutinho 及 Morimoto^[17]扩展了该模型,在标定过程中只需获得一个屏幕上的平移向量和从角膜到虚平面上的比例参量.最近, Dan Witzner Hansen 等人^[18]在相似的系

统结构下利用了单应性归一化来求解人眼注视点.而本文采用的是瞳孔角膜反射向量方法,为了检验本文方法在具有相似硬件结构的系统中的性能,将其与上述三种方法进行比较,比较结果如表 2 所示.

如表 2 所示,文献[16~18]以及本文的方法的平均误差分别是 44.5mm, 15.5mm, 11.6mm, 9.8mm.由于未考虑光轴与视轴的角度差,文献[16]的整体误差明显大于其他三种方法的.相比之下,文献[17]大幅度减小了误差,提高了注视点估计的精度,文献[18]对头部运动具

表 2 具有相似硬件结构的方法的对比(单位:mm)

瞳孔角膜反射向量		平均误差											
		文献[16]			文献[17]			文献[18]			本文方法		
width		-70	0	70	-70	0	70	-70	0	70	-70	0	70
depth = 470	height = -50	41.4	42.6	43.6	17	17.4	17.8	15.1	15.5	17.3	10.5	12.7	15.1
	height = 0	32.6	31.5	44.2	16.6	16.5	16.9	12.7	12.8	13.9	8.1	9.7	12.6
	height = 50	45.6	44.4	44.2	16.2	17.1	16.3	12.2	10.2	11.5	9	9.3	11.4
depth = 550	height = -50	41.1	40.0	42.0	14.1	12.5	13.9	12	10.6	11.4	8.8	7.4	9.3
	height = 0	42.1	41.3	45.2	14.6	12.8	14.2	10.3	7.7	10	7.6	5.5	6.7
	height = 50	48.6	43.1	48.2	15.8	13.4	15.2	10.7	7.8	10.9	10.4	6.7	7.2
depth = 630	height = -50	49.6	48.5	49.6	14.4	14.7	14.9	12.9	11.3	10.5	11.8	9	7.9
	height = 0	46.5	45.5	46.4	14.1	14.4	14.8	11.5	9.1	9.4	12.8	9.3	7.4
	height = 50	51.1	52	51.7	17.2	17.3	17.1	13.2	12.6	10.9	15.7	11.9	9.6

有更强的克服能力,其注视点估计误差增大幅度放缓。而本文方法的注视点误差估计最小,其注视点估计精度比文献[18]在整体上又提高了 15.5%。

此外,在视线角度估计精度方面,视线的角度偏差定义为 $\theta = 2 * \arctan(e/2d)$,其中 e 是真实点与估计点的误差, d 是眼睛距离屏幕的距离。从表 1 来看,在 (16cm × 10cm × 14cm) 空间里,本文建立的视线跟踪视线角度平均精度可以达到 1°。

7 结论

由于现有的瞳孔角膜反射向量法在头部运动时无法保证精度,本文提出了对头部运动具有一定鲁棒性的瞳孔角膜反射向量法,并建立起了实际视线跟踪系统。实验测得所建立的实际视线跟踪系统每秒可以处理 60 帧眼睛图像,很好地满足了实时性的要求。与其它瞳孔角膜反射向量法比较,本文方法在保证注视点估计精度的同时又能更好的克服头部运动产生的影响;同样,与其它具有相似的硬件结构的视线跟踪方法比较,本文方法在相同的头部运动空间 (16cm × 10cm × 14cm) 里的注视点估计精度最高,其精度可以达到 1°。总之,本文所建立的视线跟踪系统的性能在头部运动范围、精度以及实时性方面都有了较大的提高。

参考文献

[1] Dan Witzner Hansen, Qiang Ji. In the eye of the beholder: a survey of models for eyes and gaze[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(3): 478 - 500.

[2] Zhiwei Zhu, Qiang Ji. Eye and gaze tracking for interactive graphic display[J]. Machine Vision and Applications, 2004, 15(3): 139 - 148.

[3] Zhiwei Zhu, Qiang Ji, KP Bennett. Nonlinear eye gaze mapping function estimation via support vector regression[A]. Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition [C]. Hong Kong, China: IEEE Press, 2006. 1132 - 1135.

[4] 张闯,迟健男,张朝晖,王志良.一种基于立体视觉的视线估计方法[J].电子学报,2010,38(5):1008 - 1013.
ZHANG Chuang, CHI Jian-nan, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-liang. A novel gaze estimation method based on stereo vision[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1008 - 1013. (in Chinese)

[5] CH Morimoto, D Koons, A Amir, M Flickner. Pupil detection and tracking using multiple light sources[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(4): 331 - 336.

[6] 程成,杜菁菁,蓝飞翔.眼动交互的实时线性算法构造和实现[J].电子学报,2009,37(4A):12 - 15.
CHENG Cheng, DU Jing-jing, LAN Fe-i xiang. Research and realization on real-time linear prediction algorithm for desktop eye-tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4A): 12 - 15. (in Chinese)

[7] CH Morimoto, MRM Mimica. Eye gaze tracking techniques for interactive applications[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 98(1): 4 - 24.

[8] JJ Cerrolaza, A Villanueva, R Cabeza. Taxonomic study of polynomial regressions applied to the calibration of Video-Oculographic systems[A]. Proceedings of the 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications [C]. New York, USA: ACM Press, 2008. 259 - 266.

[9] C Hennessey, P Lawrence. Improving the accuracy and reliability of remote system-calibration-free eye-gaze tracking [J]. IEEE Transaction. Biomedical Engineering, 2009, 56(7): 1891 - 1900.

[10] 黄莹,王志良,涂序彦,戚颖.一种可适应自然头动的视线追踪系统的研制及应用[J].电子学报,2009,37(4):

764 – 770.

Huang Ying, Wang Zhiliang, Tu Xuyan, Qi Ying. Development and application of a gaze-tracking system adapting to natural head-movements[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 764 – 770. (in Chinese)

- [11] 张鹏翼, 王志良, 郑思仪, 张琼. 使用立体视觉信息的视线追踪系统设计[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(1): 47 – 51.
ZHANG Pengyi, WANG Zhiliang, ZHENG Siyi, ZHANG Qiong. A design of eye gaze tracking system using stereovision information[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(1): 47 – 51. (in Chinese)
- [12] Huabiao Qin, Weihong Yan. An adaptive calibration applying SLRA for gaze tracking[A]. Proceedings of the 2012 IET International Conference on Information Science and Control Engineering [C]. Shenzhen, China: IET Press, 2012. 119 – 122.
- [13] P Viola, M Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[A]. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. US: IEEE Press, 2001. 511 – 518.
- [14] RL Graham. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set[J]. Information Processing Letters, 1972, 4(1): 132 – 133.
- [15] DH Yoo, JH Kim, BR Lee, MJ Chung. Non-contact eye gaze tracking system by mapping of corneal reflections[A]. Proceedings of 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [C]. Washington, DC, USA: IEEE Press, 2002. 94 – 99.

- [16] DH Yoo, MJ Chung. A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion[J]. Computer Vision and Image Understanding Special Issue on Eye Detection and Tracking, 2005, 98(1): 25 – 51.
- [17] FL Coutinho, CH Morimoto. Free head motion eye gaze tracking using a single camera and multiple light sources[A]. Proceedings of the XIX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing [C]. Manaus: IEEE Press, 2002. 171 – 178.
- [18] Dan Witzner Hansen, Javier San Agustin, Arantxa Villanueva. Homography normalization for robust gaze estimation in uncalibrated setups[A]. Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research and Applications [C]. New York, USA: ACM Press, 2010. 13 – 20.

作者简介



秦华标 男, 1967 年出生于湖南省张家界市, 现为华南理工大学电子信息学院教授, 主要研究方向为智能信息处理、无线通信、嵌入式系统与 FPGA 设计。



严伟洪 男, 1987 年出生于广东省清远市, 2010 年毕业于中山大学, 现为华南理工大学电子信息学院在读硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理以及人机交互。