

基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法

张 琼 王志良 迟健男 史雪飞

(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘要 双摄像机视线追踪系统中摄像机不能直接测量视野范围以外物体的空间坐标,为解决这一问题提出了一种基于平面镜的系统标定方法。首先对双摄像机进行标定,确定两摄像机之间的关系,建立统一的世界坐标系。其次,根据平面镜成像原理确定显示器屏幕及光源镜像的空间坐标,进而确定光源及屏幕的空间位置。经实验证明该方法精度较高,在受试者距离屏幕 500~600 mm 时,视线落点平均精度可达到 1°左右,满足大多数视线追踪应用场合的需要。

关键词 机器视觉;视线追踪;系统标定;摄像机标定

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0415002

Calibration for Gaze Tracking System Based on Stereo Cameras and Plane Mirror

Zhang Qiong Wang Zhiliang Chi Jiannan Shi Xuefei

(Information Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract In stereo cameras gaze tracking system, cameras can not directly measure the object spatial coordinates outside field of view outside. In order to solve this problem, a system calibration method based on plane mirror is proposed. First, to calibrate stereo cameras to determine the relation between two cameras, a unified world coordinate system is created. Secondly, according to the plane mirror imaging principle, the spatial coordinates of the monitor screen and light source image are decided. The spatial location of light source and screen is determined. The experimental results show that the method has high precision. When the user is away from the screen 500~600 mm, the average accuracy of gazing point can reach 1°, and meet the needs of most gaze tracking applications.

Key words machine vision; gaze tracking; system calibration; camera calibration

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 110.2990; 330.1400

1 引 言

视线追踪是利用机械、电子和光学等各种检测手段获取受试者当前“注视方向”的技术。随着图像技术的不断发展,视线追踪技术在人机交互和疾病诊断等领域有了更广泛的应用^[1,2]。由于对使用者干扰少,操作简单方便等优点,基于数字视频分析(VOG)的非侵入式技术逐渐成为视线追踪技术中的研究热点。

非侵入式视线追踪系统普遍使用瞳孔-角膜反射方法。大部分基于瞳孔-角膜反射技术的视线估

计可分为基于二维映射模型的视线估计方法^[3~6]和直接的三维视线估计方法^[7~9]。采用三维视线估计方法要想达到高的精确性及稳定性还需要解决以下几个问题:1)在现存的三维视线估计方法中,大都需要 2 个摄像机,即使是采用 1 个摄像机和 2 个光源配以使用者眼睛独立参数的方案,在系统标定过程中也要使用至少 2 个摄像机,这就涉及到确立 2 个摄像机之间关系的问题。2)角膜球面中心不可见,所以需要至少 2 个光源的像去估计角膜球面中心的空间位置。3)在有光源的系统中,需要进行光源位

收稿日期: 2010-07-19; **收到修改稿日期**: 2010-11-19

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z160)和国家自然科学基金(60775042)资助课题。

作者简介: 张 琼(1979—),女,博士研究生,主要从事机器视觉、图像处理等方面研究。E-mail: zqustb@yahoo.cn

导师简介: 王志良(1956—),男,教授,主要从事人工心理、机器人和机器视觉等方面的研究。

E-mail: wzl@ies.ustb.edu.cn

置标定和屏幕位置标定,但是光源和屏幕并不在摄像机可见范围内,如何得到他们的空间位置,这是采用三维视线估计方法需要解决的难点之一。由于采用的系统装置不同,解决上述问题的方法也不相同。文献[8]借助旋转镜面估计摄像机之间的关系,文献[9]采用一套大视野摄像机建立辅助的立体视觉系统,通过这套辅助系统标定摄像机和屏幕之间的位置关系,再进行坐标系转换,前提是辅助系统必须是固定且已标定的。

针对以上问题,基于我们所开发的双摄像机双光源视线追踪系统,提出一种基于平面镜的系统标定方法。首先,对双摄像机进行标定,确定摄像机之间的关系,建立统一的世界坐标系。其次,针对光源和屏幕并不在摄像机可见范围内的问题,利用平面镜成像原理确定光源中心及屏幕的空间位置。方法

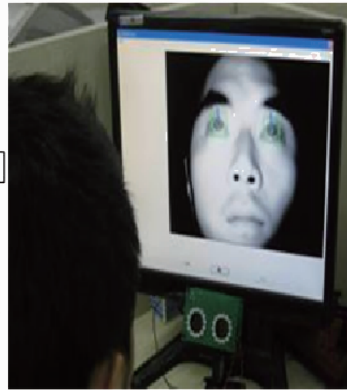
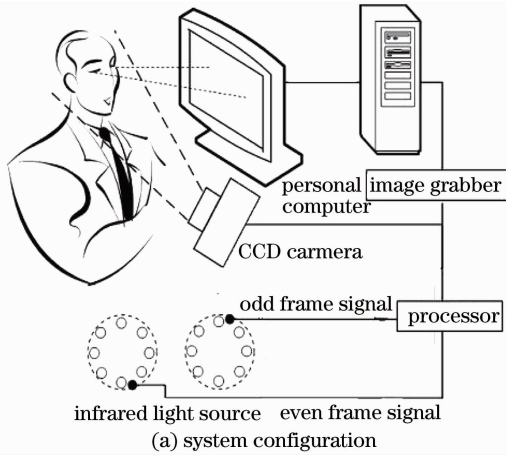


图 1 视线追踪系统

Fig. 1 Gaze tracking system

2.2 三维视线估计

三维视线估计的主要目的是要得到视线在屏幕上落点的空间坐标。建立如图 2 所示的视线方向估计模型^[6],根据凸透镜特性,如果光线 $L_1L'_1$ 直接入

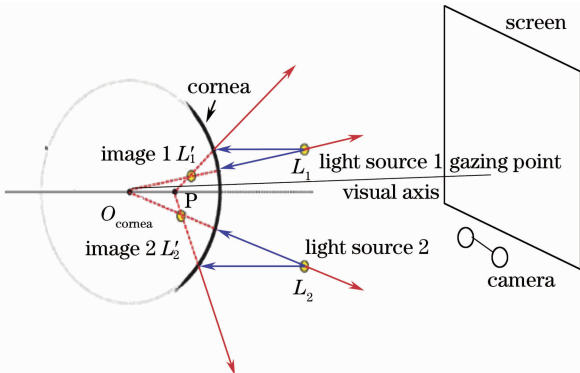


图 2 视线方向估计模型

Fig. 2 Model of gaze orientation

不仅适用于双摄像机的视线追踪系统,并可应用于其他需要确定摄像机可见范围之外物体的空间位置的研究中。

2 视线追踪系统

2.1 双摄像机双光源视线追踪系统结构

本研究所开发的双摄像机双光源视线追踪系统由光源、滤光片、镜头、图像采集卡、CCD 摄像机、GPIO 卡、单片机、电脑主机和液晶显示屏组成。使用者注视屏幕,由设立在屏幕前方的 CCD 摄像机获取人脸图像,由图像采集卡传到主机,通过眼部特征参数提取和三维视线估计模型计算视线方向,最终获得视线在屏幕上的落点。本文视线追踪系统结构流程如图 1(a)所示,设计的实际系统如图 1(b)所示。

射至角膜曲率中心,就会沿原路返回,光源虚像 L'_1 会在这条路径上。因此,光源 L_1 、虚图像 L'_1 和角膜曲率中心 O_{cornea} 在同一直线上。光源 L_2 和它的虚图像 L'_2 以及角膜曲率中心点 O_{cornea} 在直线 $L_2L'_2O_{cornea}$ 上,那么直线 $L_2L'_2O_{cornea}$ 和直线 $L_1L'_1O_{cornea}$ 会交于 O_{cornea} 。使用双摄像机组成视线追踪系统,获得三维视线估计的步骤如下:

1) 通过亮暗瞳作差来定位瞳孔中心的虚像 P 及光源的虚像 L'_1 和 L'_2 , 根据双摄像机标定结果计算其三维坐标。

2) 连接角膜球面中心 O_{cornea} 和瞳孔中心虚像 P 得到直线 OP 就是眼球的光轴 V_p 。角膜曲率中心的空间位置 O_{cornea} 可以通过 $L_1L'_1$ 和 $L_2L'_2$ 得到:

$$\begin{cases} O_{cornea} = L_1 + K_1(L_1 - L'_1) \\ O_{cornea} = L_2 + K_2(L_2 - L'_2) \end{cases}, \quad (1)$$

只要已知 L_1, L_2, L'_1, L'_2, P 这 5 个空间点, 则只需进行一次直线求交运算, 就可以得到眼球光轴方向为

$$V_P = O_{\text{cornea}} + k(P - O_{\text{cornea}}). \quad (2)$$

3) 由于视线落点是视轴与屏幕的交点, 因此需要进行光轴与视轴之间的转换。根据用户校正结果, 利用光轴和视轴之间的关系和补偿算法得到视线方向即视轴的直线方程为

$$V_v = O_{\text{cornea}} + k'(P - O_{\text{cornea}}). \quad (3)$$

4) 计算视轴与屏幕交点即为视线注视点。

综上所述, 要得到视线落点的空间坐标, 需要计算 L_1, L_2, L'_1, L'_2 和 P 这 5 个空间点坐标和屏幕的平面方程。通过提取眼部特征得到 L'_1, L'_2 和 P 的图像坐标, 再根据系统标定的结果计算出 L'_1, L'_2 和 P 的空间坐标。 L_1, L_2 和屏幕方程这些参数需要通过系统标定获得。

3 视线追踪系统标定

3.1 双摄像机标定

摄像机标定是计算机视觉和三维测量中最基本、最重要的工作^[10]。双摄像机标定的目标是建立一个统一的世界坐标系, 使整个视线追踪系统都处于同一坐标系中, 并确定系统中两个摄像机之间的位置关系。

1) 摄像机标定。采用张正友法^[11], 张正友基于模板的标定方法精度较高, 适合于摄像机固定的场合^[12]。分别对左右摄像机进行标定, 得到 2 个摄像机的内参数以及它们的外参数 R 和 T 。其中 R 和 T 分别为摄像机相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。

2) 双摄像机相对关系的确定。设空间一点在世界坐标系、左摄像机坐标系和右摄像机坐标系下的非齐次坐标分别为 X_w, X_l 和 X_r , 则有

$$\begin{cases} X_l = R_l X_w + T_l \\ X_r = R_r X_w + T_r \end{cases}. \quad (4)$$

两摄像机之间的关系可表示为

$$\begin{cases} R = R_r R_l^{-1} \\ T = T_r - R_r R_l^{-1} T_l \end{cases}. \quad (5)$$

本文设定左摄像机坐标系为世界坐标系, 那么右摄像机在世界坐标系中的位置可以通过上式得到。

3.2 系统标定

标定双相机之后, 确定空间一点的位置最直接的方法就是检测空间点在各摄像机拍摄图像中的像素坐标, 利用已标定的双摄像机之间的关系, 基于视差原理^[3], 通过三角测量法得到其三维坐标。但是在视线追踪系统中, 需要确定空间位置的显示器屏幕和光源并不在摄像机的可视范围内, 所以上述方法并不适用。本方法使用一面平面镜反射屏幕图像到摄像机的视野之内。其中一个标定模板附在镜子表面, 另一个标定模板附在屏幕上。要求摄像机拍到的图像中均有镜子、屏幕的像及光源的像。

系统标定时光求镜平面标定模板、屏幕标定模板镜像和光源中心镜像的三维坐标; 通过得到的空间点三维坐标估计镜平面及屏幕像平面; 根据离差求光源镜像关于镜平面的对称点即光源的真实三维坐标和屏幕像平面关于镜平面的对称平面屏幕。

1) 三维坐标测量

设定左摄像机 $O_l x_l y_l z_l$ 位于世界坐标系原点且无旋转, 图像坐标系为 $O_l - X_l Y_l$, 焦距为 f_l , 右摄像机坐标系为 $O_r - x_r y_r z_r$, 图像坐标系为 $O_r - X_r Y_r$, 焦距为 f_r , 双目测量原理如图 3 所示。

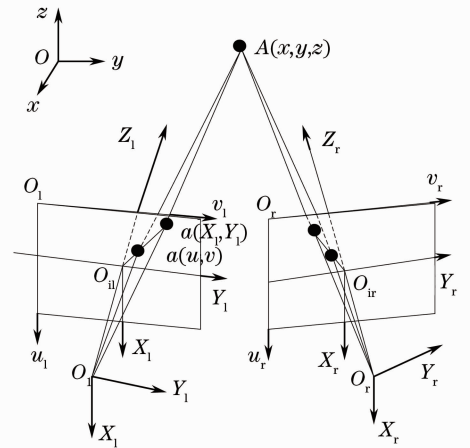


图 3 双目测量原理

Fig. 3 Binocular vision measurement principle
根据摄像机透视变换模型有

$$Z_{lc} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{lr} & s_l & u_{l0} \\ 0 & f_{ly} & v_{l0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_l & t_l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_5 & h_6 & h_7 & h_8 \\ h_9 & h_{10} & h_{11} & h_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

H 为投影矩阵,同理设右摄像机的投影矩阵为

$$H' = \begin{bmatrix} h'_1 & h'_2 & h'_3 & h'_4 \\ h'_5 & h'_6 & h'_7 & h'_8 \\ h'_9 & h'_{10} & h'_{11} & h'_{12} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由两摄像机关系得到

$$\begin{bmatrix} h_1 - X_1 h_9 & h_2 - X_1 h_{10} & h_3 - X_1 h_{11} \\ h_5 - X_1 h_9 & h_6 - X_1 h_{10} & h_7 - X_1 h_{11} \\ h'_1 - X_r h'_9 & h'_2 - X_r h'_{10} & h'_3 - X_r h'_{11} \\ h'_5 - X_r h'_9 & h'_6 - X_r h'_{10} & h'_7 - X_r h'_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 h_{12} - h_4 \\ X_1 h_{12} - h_8 \\ X_r h'_{12} - h'_4 \\ X_r h'_{12} - h'_8 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

方程组中有 3 个未知数,4 个方程,求该超定方程的最小二乘解即可得到 (x, y, z) 。

当已知 2 个摄像机的内参数及空间点在左右摄像机所拍摄图像中的图像坐标后,即可按照上述方法得到被测点的三维坐标。

2) 平面估计

当得到屏幕镜像和镜子上的一系列点的三维坐标后,分别对这些点做平面拟合,得到镜平面和屏幕镜像平面。

设平面为: $z = a_0 x + a_1 y + a_2$

对于所求得的 n 个点: $(x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, \dots, n-1 (n \geq 3)$, 要估计上述平面方程,需使 $S = \sum_{i=0}^{n-1} (a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 - z_i)^2$ 最小,则应满足: $\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, (k = 0, 1, 2)$ 。

即

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

解上述方程组,即得到平面方程 $z = a_0 x + a_1 y + a_2$ 。

3) 确定屏幕平面及光源中心的空间位置

根据图 4 中平面镜成像原理,取屏幕镜像平面 T_1 上点 $M(x_1, y_1, z_1)$,其中 T_1 为屏幕 T_2 的镜像平面,点 M 为点 $Q(x_2, y_2, z_2)$ 的镜像,镜面 π 为 $Ax + By + Cz + D = 0$,法向量为 \mathbf{n} 。设点 M 到镜面 π 的离差为 $\delta = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$ 。由于点 M 和 Q 位于

镜面 π 的异侧,因此其离差互为相反,即 $\frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = -\frac{Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$,

而 $\mathbf{MQ} // \mathbf{n}$,故有 $\frac{x_2 - x_1}{A} = \frac{y_2 - y_1}{B} = \frac{z_2 - z_1}{C} = \rho$,

由此可得 $\rho = -\frac{2(Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$,整理可

得点 $Q(x_2, y_2, z_2)$, 即

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} - \rho \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由于点 M 和 Q 关于 π 互为对称点,由(10)式可得到

$$\begin{cases} x_1 = x_2 - \frac{2A(Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \\ y_1 = y_2 - \frac{2B(Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \\ z_1 = z_2 - \frac{2C(Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \end{cases}, \quad (11)$$

将(11)代入屏幕镜像 T_1 的方程,即得到屏幕 T_2 。光源中心的三维坐标也可通过(10)式求出。

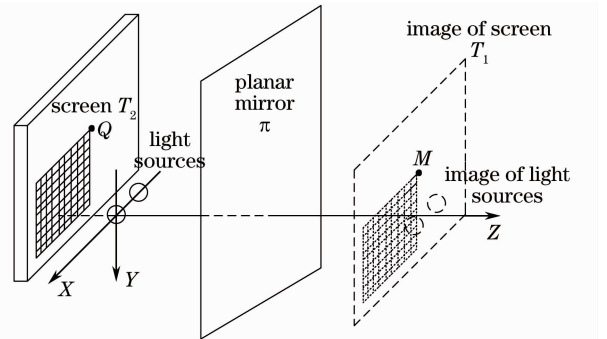


图 4 平面镜成像原理

Fig. 4 Planar mirror imaging principle

由以上步骤可求出光源中心的真实三维坐标 L_1, L_2 和屏幕的平面方程,通过瞳孔特征检测和三维坐标测量求出光源的虚图像 L'_1, L'_2 ,分别代入(1)式和(3)式,再与屏幕的平面求交,就得到视线落点的三维坐标。

4 实验结果

4.1 双摄像机标定和系统标定后果

标定所用图像共 20 幅,在摄像机前多角度转动

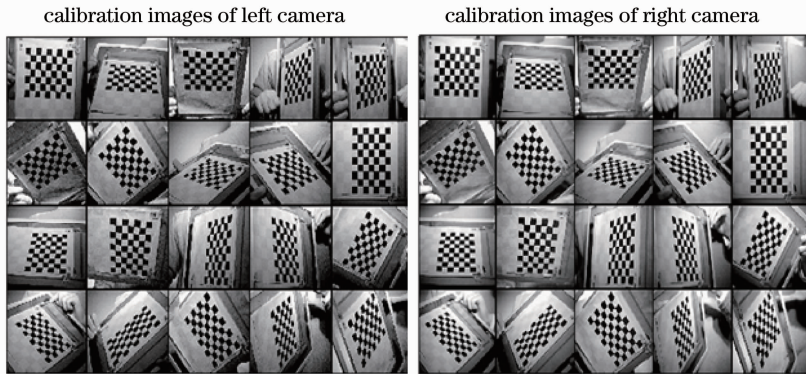


图 5 标定图像

Fig. 5 Calibration images

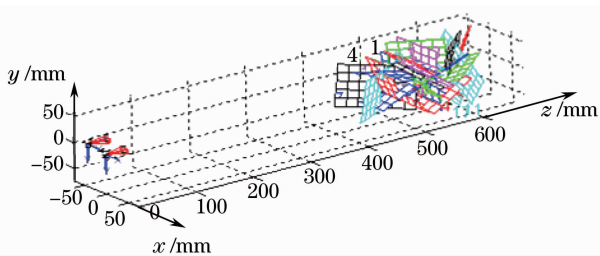


图 6 左摄像机坐标系下的外参数

Fig. 6 Exterior parameter in the left camera's coordinates system

通过平面镜拍摄的图像如图 7 所示。从图中可以看出,光源及屏幕都出现在双摄像机可视范围内。首先对图像进行预处理,通过 Hough 变换检测得到屏幕标定模板和镜面标定模板上角点的图像坐标,

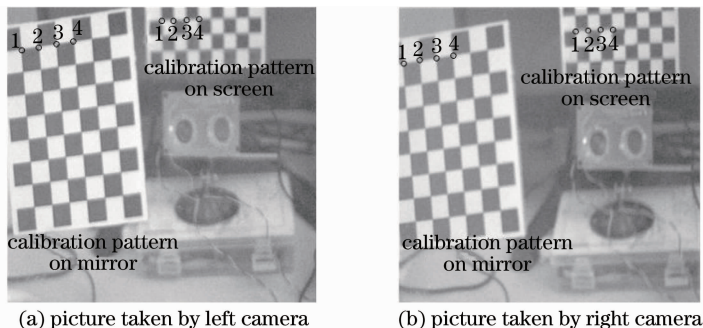


图 7 借助平面镜拍摄的图像对

Fig. 7 Pictures with the aid of planar mirror

4.2 误差分析

由于双目立体视觉中存在测量误差^[15],系统标定过程中也会引入一定误差,整个系统的误差并不是这些误差简单的叠加或是线性关系,所以使用了一种较为实际的最终误差评估方法^[6]。通过第 3.1 节中

拍摄的标定图像如图 5 所示,设定左摄像机的 CCD 中心为世界坐标系中心,图 6 为左摄像机及所有标定图像在世界坐标系中的位置。

检测出图像中光源所在的外环圆,再求出圆心坐标^[14]。图 7 中标定模板上部分角点和光源中心的图像坐标如表 1 所示。得到标定模板所有可配对的角点及光源中心的图像坐标后,根据第 3.2 节中的方法计算出各点的三维坐标,再通过拟合得到镜平面和屏幕镜像平面,根据平面镜成像的离差计算出真实光源中心的空间坐标和屏幕平面的空间位置。最后代入(1)式和(3)式得到视线落点。

实际视线追踪过程中,使用者注视屏幕上固定的注视点,由亮暗瞳定位瞳孔,根据双摄像机标定结果,可计算光源像的三维坐标和瞳孔中心的三维坐标。再结合系统标定参数,根据视线方向估计模型计算出视线方向,视线方向与屏幕的交点即为实际视线的落点。

的三维坐标测量方法可得到标定模板上多个角点的三维坐标,计算两两相邻的角点的坐标可得到棋盘格的边长,即 $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$, 其与实际边长的误差可衡量标定的精度。计算出的空间距离及其与实际边长的相对误差如表 2 所示,

表 1 部分点的图像坐标与三维坐标

Table 1 Image coordinates and 3D coordinates of some points

	No.	Image	Image	The 3D coordinates of corresponding points
		coordinates in 7(a)	coordinates in 7(b)	
Corner on calibration pattern of mirror	1	(35.11, 83.42)	(11.68, 108.25)	(96.3, -56.7, 524.1)
	2	(79.20, 77.53)	(53.15, 103.44)	(85.3, -59.3, 535.3)
	3	(122.70, 73.01)	(96.03, 97.61)	(73.7, -61.7, 545.9)
	4	(165.48, 67.55)	(138.90, 93.24)	(61.7, -63.6, 556.6)
Corner's image on calibration pattern of screen	1	(381.77, 27.05)	(447.14, 17.26)	(19.1, -173.7, -140.8)
	2	(413.02, 26.12)	(478.09, 15.30)	(3.0, -174.6, -140.9)
	3	(442.64, 25.08)	(508.49, 13.25)	(-12.9, -175.4, -141.1)
	4	(472.58, 24.13)	(539.02, 12.16)	(-29.1, -177.1, -141.3)
Image of light sources' centre	Left	(439.26, 241.38)	(506.33, 261.29)	(-2.01, 4.53, 27.31)
	Right	(533.94, 236.40)	(601.13, 260.77)	(-51.41, 2.00, 31.73)

其中标定模板上棋盘格的实际边长均为 16 mm。由表 2 可以看出,本文所采用的方法计算出的空间坐标误差很小,能够满足视线追踪系统对空间三维坐标精度的要求。

表 2 空间距离计算结果及误差

Table 2 Dimensional distance calculation result and error

	Nearby corners	The distance between nearby corners /mm	Relative error /%
Calibration pattern of mirror	1-2	15.91	0.56
	2-3	15.89	0.69
	3-4	16.19	1.19
Calibration pattern of screen	1-2	16.12	0.75
	2-3	15.92	0.5
	3-4	15.94	0.38

在本文的视线追踪系统中,视线追踪的精度误差主要来源于系统标定误差和视线估计模型误差。除此之外,还可能受人眼生理特点的影响,如眼球震颤和一些无意识的眼部运动,会使视线落点估计值形成围绕预定点的一系列点,但是这些轻微的眼部运动对人机交互的影响很小。

对系统标定后的视线落点误差进行评估,实验环境的屏幕分辨率为 1280×1024。在视线追踪实验中,选取 10 位受试者,在距离屏幕 500~600 mm 处其中每位受试者都需依次注视屏幕上设定的 9 个注视预定点,对于每个预定点注视时间至少保持 2 s,获得多个估计视线落点。根据本文中双摄像机的标定结果,对数据进行离线处理,逆向计算出其图像坐标。通过比较预定点和估计视线落点的图像坐标差值,分别计算受试者在注视预定点时间内所有落点误差均值。实验结果如图 8 所示,视线落点平均精度可达到 1°左右,满足大多数视线追踪应用场合的需要。

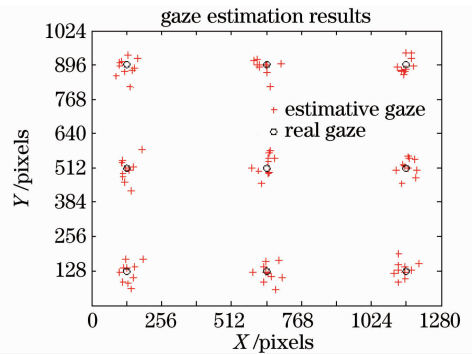


图 8 估计视线与真实视线的比较

Fig. 8 Comparison between with estimative gazing points and real gazing points

5 结 论

实验证明,本文提出的基于平面镜的系统标定方法为视线追踪系统视线方向的计算提供了重要的支持,具有较高的测量精度。本方法可操作性较强、精度满足本文中的双摄像机视线追踪系统,不仅适用于采用三维视线估计方法的双摄像机双光源视线追踪系统,也可推广到具有相似问题的立体视觉系统中。但是该方法也有一定的限制:1)标定过程复杂,不能一步完成;2)相机对于系统的相对位置发生变化时,需要重新标定;3)对于精度要求更高的系统,还需要进一步提高三维测量的精度。

参 考 文 献

- 1 Z. Zhu, Q. Ji. Eye and gaze tracking for interactive graphic display[J]. *Mach. Vis. Applicat.*, 2004, 15(3): 139~148
- 2 K. H. Tan, D. Kriegman, H. Ahuja. Appearance based eye gaze estimation[C]. *Proce. IEEE Workshop Applications of Computer Vision*, 2002. 191~195
- 3 J. Zhu, J. Yang. Subpixel eye gaze tracking[C]. *Proc. IEEE Inr. Conf. Automatic Face and Gesture Recognition*, Washington, D. C. 2002. 131~136

- 4 H. Morimoto, M. Mimica. Eye gaze tracking techniques for interactive applications [J]. *Comput. Vi. Image Understan. Special Issue on Eye Detection and Tracking*, 2005, **98**(1): 4~24
- 5 D. Guestrin, M. Eizenman. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections [J]. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2006, **53**(6): 1124~1133
- 6 Z. Zhu, Q. Ji. Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement [J]. *IEEE Trans. Biomed. Engng.*, 2007, **54**(12): 2246~2260
- 7 A. Villanueva, R. Cabeza. A novel gaze estimation system with one calibration point [J]. *IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics-Part B*, 2008, **38**(4): 1123~1138
- 8 D. Beymer, M. Flickner. Eye gaze tracking using an active stereo head[J]. *Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003. 451~458
- 9 S. W. Shih, J. Liu. A novel approach to 3D gaze tracking using stereo cameras [J]. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 2004, **34**(2): 234~245
- 10 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
姜广文, 晁志超, 伏思华 等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 11 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 12 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3433~3439
孙军华, 刘 震, 张广军 等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3433~3439
- 13 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 14 Shang Fei, Wang Fenggui, Tian Di *et al.*. A method for circle detection based on right triangles inscribed in a circle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 739~743
商 飞, 王丰贵, 田 地 等. 一种基于圆内接直角三角形的圆检测方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 739~743
- 15 Li Haibin, Shan Wenjun, Liu Bin. Research of error-model on two eyes stereoscopic measurement system [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 24~26
李海滨, 单文军, 刘 彬. 双目立体视觉测距系统误差模型的研究 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 24~26
- 16 Quan Houde, Yan Shoucheng, Zhang Hongcai. The evaluation of camera calibration accuracy in computer vision [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, **23**(3): 222~224
全厚德, 闫守成, 张洪才. 计算机视觉中摄像机标定精度评估方法 [J]. *测绘科学技术学报*, 2006, **23**(3): 222~224