

6-14-2018

Eye Gaze Tracking in 3D Immersive Environments

Xincan Zhao

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

Shihao Pan

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

Yaping Wang

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

Tie Yun

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Eye Gaze Tracking in 3D Immersive Environments

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that human-computer interaction in immersive environments is entirely dependent on the body movement with low operational efficiency, a 3D eye gaze tracking method is proposed to gain the 3D gaze point of the user. Thus the interactive operation could be achieved, which provides a natural and bidirectional way for interaction. The Leap Motion controller is innovatively used to track the coordinates of eyes and the head position is tracked with the motion capture device. The gaze point under free movement can be estimated based on the mapping equation that is obtained in the initial calibration state. Experimental results show that when user moves freely in the 3.0 m×3.2 m×2.0 m space, the frequency of estimation of 3D gaze point is up to 60 Hz and the error is within 45 mm, which lays a foundation for the wide application of eye gaze tracking in immersive virtual environments.

Keywords

3D gaze tracking, dual gaze vectors, immersive environments, free movement

Recommended Citation

Zhao Xincan, Pan Shihao, Wang Yaping, Tie Yun. Eye Gaze Tracking in 3D Immersive Environments[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2027-2035.

沉浸式三维视线追踪算法研究

赵新灿, 潘世豪, 王雅萍, 帖云

(郑州大学信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 针对大型沉浸式虚拟环境中人机交互完全依赖肢体动作且效率低等问题, 提出利用三维视线追踪技术得到用户注视点, 以实现交互操作, 为沉浸式环境提供一种自然、双向的交互手段。创新性地使用 Leap Motion 用于瞳孔位置跟踪, 通过被动式光学追踪设备获取使用者的头部运动状态, 依据初始标定得到的映射方程来估计使用者大空间范围内自由运动状态下的三维注视点。实验表明, 使用者在 3.0 m×3.2 m×2.0 m 的空间内自由运动时, 集成系统对三维注视点的估计频率可达 60 Hz, 估计误差小于 45 mm, 为视线追踪在沉浸式虚拟环境中的广泛应用奠定了基础。

关键词: 三维视线追踪; 双视线向量; 沉浸式环境; 自由运动

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2027-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806004

Eye Gaze Tracking in 3D Immersive Environments

Zhao Xincan, Pan Shihao, Wang Yaping, Tie Yun

(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem that human-computer interaction in immersive environments is entirely dependent on the body movement with low operational efficiency, a 3D eye gaze tracking method is proposed to gain the 3D gaze point of the user. Thus the interactive operation could be achieved, which provides a natural and bidirectional way for interaction. The Leap Motion controller is innovatively used to track the coordinates of eyes and the head position is tracked with the motion capture device. The gaze point under free movement can be estimated based on the mapping equation that is obtained in the initial calibration state. Experimental results show that when user moves freely in the 3.0 m×3.2 m×2.0 m space, the frequency of estimation of 3D gaze point is up to 60 Hz and the error is within 45 mm, which lays a foundation for the wide application of eye gaze tracking in immersive virtual environments.

Keywords: 3D gaze tracking; dual gaze vectors; immersive environments; free movement

引言

CAVE 是一种典型的大屏幕、多人、沉浸感强的虚拟现实显示系统, 随着光栅立体、分时立体等

三维显示技术的成熟, 其在大规模数据可视化、工业设计及虚拟维修培训中发挥越来越重要的作用。CAVE 中虚拟物体的选取和操作基本都是通过手柄控制器和数据手套实现, 存在使用困难、操作效率低等问题, 如何在沉浸式虚拟环境中解放操作人员双手, 提高操作效率一直是沉浸式交互的难题。人的视线具有直接性、自然性和双向性等其它感官所无法具备的特点, 人们对视线的研究有着浓厚的兴趣, 获得用户的感兴趣区域, 为用户提供一种直



收稿日期: 2016-04-27 修回日期: 2016-08-03;
基金项目: 国家自然科学基金(U1433106, U1504606),
中国博士后科学基金(2016T90679, 2015M582201);
作者简介: 赵新灿(1972-), 男, 山东曹县, 博士, 副教授, 研究方向为增强现实、人机交互; 潘世豪(1990-), 男, 河南平顶山, 硕士生, 研究方向为虚拟现实、人机交互。

<http://www.china-simulation.com>

• 2027 •

接、自然及双向交互手段,在自然环境、虚拟现实和增强现实中均有重要意义。

目前的视线追踪技术,依照获得的视线坐标类型划分可分为二维视线追踪和三维视线追踪;依照设备和使用者之间的关系划分则可分为侵入式视线追踪方法和非侵入式视线追踪方法。

二维视线追踪常采用二维回归方法^[1]。其核心是求取眼部图像特征与二维注视点之间的参数化或非参数化的映射关系, Dong Hyun Yoo^[2]使用单相机采集四光源在角膜上反射的高光点,基于射影空间内四个高光点的交比不变量来映射得出注视点; Zhang Z^[3]和 Shin Y G^[4]分别对传统的单相机四光源进行改进,前者采用双相机四光源利用双眼固视约束来提高视线估计精度,后者采用单相机双光源以降低设备复杂度;非参数化的回归建模方法如支持向量机^[5]和神经网络^[6]等方法也被用来进行视线估计。三维视线追踪则常采用三维建模方法,其使用经过预先标定且坐标位置已知的双摄像机^[7-8]或 RGB-D 传感器^[9-10]来估计眼球的视线方向,该方法可以容忍使用者稍大范围的头部运动。

上述非侵入式的视线追踪方法仅适用于桌面环境,只允许在距显示屏幕 50 cm 左右的座位上进行小范围头部运动。侵入式视线追踪方法需要用户佩戴特制的眼镜^[11]、头盔^[12]等设备以保持摄像机与眼睛的相对位置不变,得益于其较高的视线追踪精度以及佩戴设备后用户可自由移动等特性,常用于运动视觉分析、平面设计、应用心理学研究等领域。这些方法虽允许使用者佩戴设备在较大空间范围内自由移动,却只能对视景图像和注视坐标进行叠加记录,少有文献研究人体自由运动状态下基于侵入式视线追踪设备的视线交互问题。

本文针对沉浸式环境中人机交互困难,输入与输出效率极为不平衡的问题,构建了一套应用在沉浸式环境中,具有三维视线追踪功能的头盔系统,该系统借助手势跟踪设备 Leap Motion 追踪使用者的瞳孔位置,通过用户标定过程获得视线的二维回归映射模型;使用被动红外光学位置跟踪设备捕捉

人体运动状态,将二维映射模型扩展至整个空间,从而实现沉浸式环境中人体自由运动状态下的三维实时视线追踪,为沉浸式环境中目标物体选取、移动等操作提供一种自然的交互手段。

1 沉浸式三维视线追踪算法原理

沉浸式三维视线追踪系统包括沉浸式环境和三维视线追踪头盔两部分。沉浸式环境主要包括背投显示屏幕、架设于使用者活动空间上方的被动红外光学动作捕捉设备、嵌有 LED 和红外反光球的九点标定架以及标定时辅助头部静止的支架等设备,如图 1 所示。三维视线追踪头盔包括 Leap Motion、分时立体镜片、动作捕捉标志点和机械调整部分,如图 2 所示。头盔上相对头部静止的 Leap Motion 用于获取瞳孔的三维坐标;架设于空间上方的被动红外光学动作捕捉设备和固定于头盔上的动作捕捉标志点用于捕捉使用者头部的三维位姿;九点标定架上的 LED 用于引导标定,反光球用于标识标定点的空间坐标;分时立体镜片用于交替遮挡左右眼,产生双眼视差以获得具有深度感的场景。

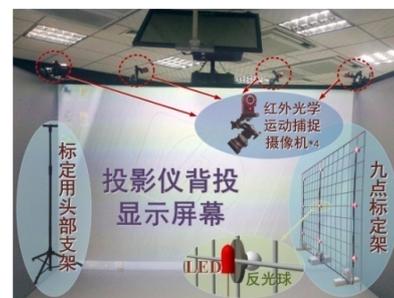


图 1 实验环境硬件组成

Fig. 1 Components of the experimental equipment and environment



图 2 三维视线追踪头盔

Fig. 2 Helmet for 3D eye gaze tracking

在系统中定义 6 个坐标系: 标定架坐标系 C (Calibration)、虚拟标定架坐标系 V (Virtual calibration)、运动捕捉设备坐标系 D (Device)、初始标定头部坐标系 H_I (Initial)、人体自由运动头部坐标系 H_M (Motional) 和 Leap Motion 摄像机坐标系 L (Leap Motion), 其中以运动捕捉设备坐标系 D 为世界坐标系, 初始标定头部坐标系 H_I 和人体自由运动头部坐标系 H_M 是头盔坐标系 H (Helmet) 的两种状态; 定义两个空间平面: 标定平面 Π_C 、虚拟标定平面 Π_V ; 定义五个空间点: 瞳孔中心点 Pupil(左右分别记为 P_l 、 P_r), 位于虚拟标定平面上的虚拟注视点 Sight(左右分别记为 S_l 、 S_r) 以及使用者的真实注视点 Focus(记为 F), 如图 3 所示。

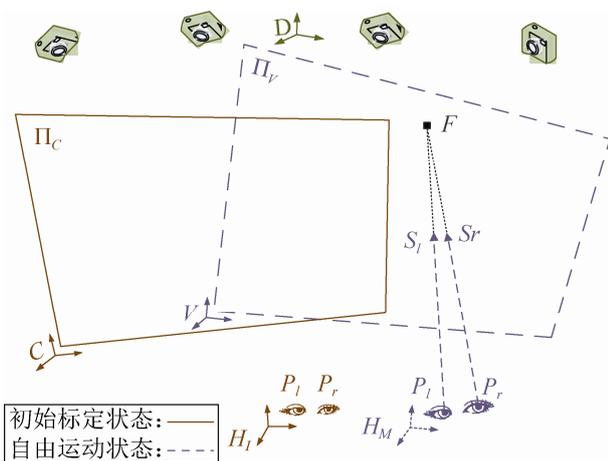


图 3 视线追踪系统简化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the eye gaze tracking system

在使用者进行初始标定时, 标定架坐标系 C 和初始标定头部坐标系 H_I 之间的坐标变换关系如图 3 中的实线所示。标定结束之后, 使用者可以在运动捕捉设备工作空间之内自由运动, 此时原本与标定平面 Π_C 重合的虚拟标定平面 Π_V 跟随使用者头部做相同的运动变换, 如图 3 中虚线所示。获取某时刻双眼 P_l 与 P_r 的三维坐标和双眼视线在虚拟标定平面 Π_V 上的落点三维坐标, 可构建使用者双眼的视线向量 $\overrightarrow{P_l S_l}$ 与 $\overrightarrow{P_r S_r}$ 。主要步骤如下:

(1) 视线向量的构建

视线向量的起点为使用者的瞳孔中心, 终点为

虚拟注视点, 即虚拟标定平面上的注视点。瞳孔中心坐标由位于头盔上的 Leap Motion 进行测定; 虚拟注视点则依据初始标定所得的回归模型和瞳孔中心坐标进行映射得到。

(2) 视线向量的运动变换

完成标定之后, 使用者即可自由运动。在自由运动状态下虚拟标定平面与头部做相同的运动变换, 静态的回归模型依据该运动变换可适用于运动状态, 该变换通过运动捕捉设备对头盔上的运动捕捉标志点进行追踪得到。

(3) 三维注视点定位

通过计算使用者双眼的视线向量, 依据光的直线特性和双眼复视时的约束特性可知, 两条空间视线向量的交点 F 即为此刻双眼注视点。

2 基于 Leap Motion 的瞳孔追踪算法

2.1 基于 Leap Motion 的瞳孔定位设备

瞳孔作为视线向量的起点, 是视线向量的重要组成部分。然而由于眼球结构精细脆弱且不可修复, 故只能采用光学等非接触的测量方法来测量其空间位置。在结构光、飞行时间和立体视觉等几种光学三维测量方法中, 综合考虑安全问题、设备的体积和功耗以及辅助光线对视野的干扰等因素, 选用立体视觉的方法来测量瞳孔的空间三维坐标。

追踪设备 Leap Motion^[13]具有两个短视距的红外鱼眼摄像机可以采集近距离、大视野且具有视差的图像, 其三个红外光发射器和散光嵌板可以保证摄像机视野不受环境光的影响, 同时其工作于红外波段, 不会对使用者的视线造成干扰; 得益于 Leap Motion 提供的 SDK, 用户可以获得其两个红外摄像机的实时图像和储存于固件内的摄像机内外参数; 通过一组具有视差的图像和摄像机的内外参数可恢复场景的度量性质。基于上述考虑, 采用红外深度传感器 Leap Motion 来完成瞳孔的定位。

关于 Leap Motion 在获取深度信息的精度方面, 文献[14-15]均做了深入详尽地分析, 均指出

Leap Motion 可达到亚毫米的精度：在静止状态下精度约为 0.2 mm，在运动状态下精度约为 1.2 mm。在本实验中 Leap Motion 距眼球仅有 30 mm 左右，与其正常的工作距离 250 mm 有较大的差距，为了测试 Leap Motion 的鱼眼摄像机在较近视野内的精度范围，设计了如图 4 所示的实验。实验中将 Leap Motion 固定于 3D 打印的测试支架的指定位置，然后将反光标志点固定于测试支架中坐标位置已知的不同横柱的末端，并记录此时 Leap Motion 测得的光标志点在摄像机坐标系中的三维坐标。

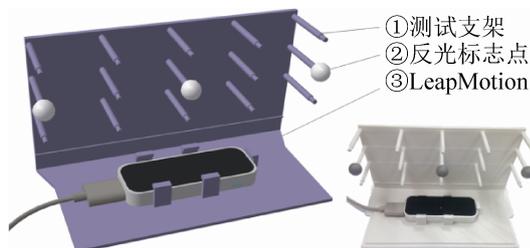


图 4 Leap Motion 精度测试实验设备
Fig. 4 Equipment for measuring the accuracy of Leap Motion

对 16 个不同位置均进行 20 次采样，求其平均值作为测量结果。由于视野限制，可测得 14 个位置的坐标，测量结果如图 5 所示。计算求得 Leap Motion 较近视野内测量值的均方根误差为：水平方向误差为 0.92 mm，竖直方向误差为 1.82 mm，平均误差为 1.37 mm。使用 Leap Motion 来近距离追踪瞳孔的三维坐标具有可行性。

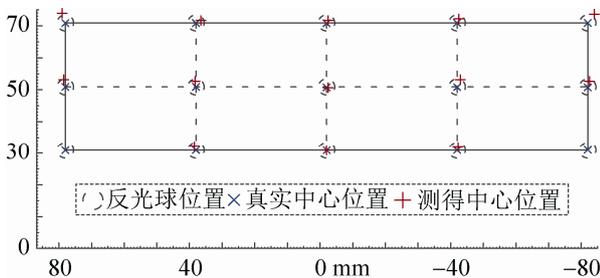


图 5 Leap Motion 精度测试结果
Fig. 5 Accurate measuring result of Leap Motion

如图 6 所示为瞳孔定位设备的机械结构，设备

有两个旋转副、一个平移副共 3 个自由度可供调节，以便针对不同的使用者进行个性化的调整。为了不遮挡使用者的视野，将 Leap Motion 固定于使用者眼睛下方；为了避免过强的红外线对眼球造成损害，使用遮光板对 Leap Motion 的红外光进行遮挡；为了可以使完整的眼部区域(约 130 mm×50 mm)处于 Leap Motion 摄像机 150°的视野之内，需置 Leap Motion 于距眼部 15 mm 之外。

记摄像机坐标系 L (Leap Motion)和头盔坐标系 H (Helmet)之间的坐标变换关系为 τ_1 ，该变换关系在进行机械设计时已知，且

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 10^\circ & \sin 10^\circ & -5 \\ 0 & -\sin 10^\circ & \cos 10^\circ & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$



图 6 瞳孔定位设备的机械调整结构
Fig. 6 Adjustment mechanism of the pupil detection device

2.2 基于 Leap Motion 的瞳孔定位方法

在二维视线追踪技术中常用的眼动描述方法有基于 RANSC 算法计算瞳孔的椭圆中心^[16]、基于 StarBurst 算法求取瞳孔圆形中心^[17]、构建瞳孔-角膜反射向量或瞳孔-眼角向量^[18]描述瞳孔的运动，这些方法只能得到瞳孔的二维坐标信息。为了得到瞳孔的三维坐标信息，通过 Leap Motion 来获取双眼红外图像并计算双眼瞳孔的三维坐标信息。瞳孔三维坐标的计算过程包含设置感兴趣区域、高斯滤波、自适应二值化、形态学开运算、提取轮廓中心、获取视差信息和计算三维坐标 7 个步骤。

首先依经验设置眼部区域为感兴趣区域，以降低算法复杂度、提高帧率。然后采用低通高斯滤波器进行平滑处理，以减少图像的高斯噪声并降低图像细节层次。之后采用最大类间方差法进行自适应阈值的二值化处理，以快速去掉背景部分，得到灰

度值较低的含有瞳孔的区域, 这些灰度值较低的区域或包含瞳孔、睫毛、眼睑以及虹膜纹理、噪声等区域。为消除其中较小的非瞳孔区域, 并在纤细处使其余区域彼此分开, 采用 3×3 的矩形模板进行连续的图像腐蚀和膨胀以进行形态学开运算。由于瞳孔是图像中最主要的低亮度区域, 故面积最大的低亮度区域最为可能是瞳孔区域, 轮廓中心即为瞳孔中心。至此, 可得到左右摄像机成像平面中双眼瞳孔中心的像素坐标信息, 计算视差并借助 Leap Motion 的 SDK 即可求得双眼瞳孔中心的三维坐标。图 7 所示为双眼瞳孔三维坐标的计算过程。

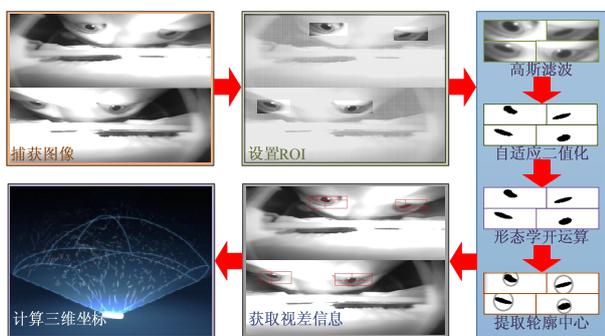


图 7 瞳孔三维坐标的计算过程

Fig.7 Procedure for calculating the 3D coordinates of pupils

实验中 Leap Motion 红外摄像机图像采集速度可达 120 fps、分辨率为 640×240 像素。由于算法中只对感兴趣区域进行图像处理, 单帧耗时较短, 约为 0.01 s, 故瞳孔三维坐标更新频率可达 100 Hz。若测得瞳孔相对于 Leap Motion 的三维坐标 $[x \ y \ z \ 1]^T$, 即可得到瞳孔相对于头盔坐标系的三维坐标 $P = \tau_1[x \ y \ z \ 1]^T$ 。

3 自由运动状态空间定位方法

3.1 三维位置和姿态追踪

头盔和嵌于标定架上的标定点的空间位置或姿态由光学位姿追踪设备进行测量, 光学位姿追踪设备通过对目标上特定光点的追踪来实现。对于空间中的一个点, 只要同时被两台摄像机拍摄到, 则根据拍摄到的图像和摄像机内外参数, 就可以把图

像的二维坐标还原到三维坐标, 从而确定这一时刻该点在空间中的位置。如果同时对多个光点进行跟踪, 则可以用多个光点构成的空间结构来描述被跟踪物体的三维位置和姿态。

使用光学追踪设备前需对其进行标定, 该过程分为两步, 首先进行基于一维标定物的标定, 以求解摄像机的内外参数, 之后使用坐标标定架标定, 以确定摄像机坐标系 D 即世界坐标系的原点和坐标方向。光学追踪系统的标定过程如图 8 所示。

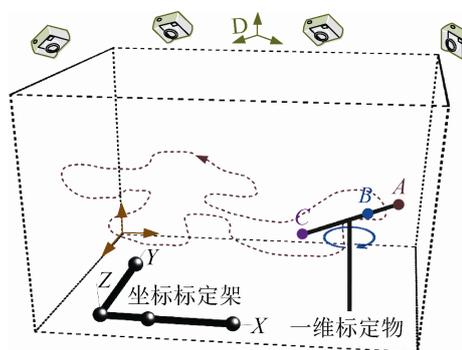


图 8 光学追踪设备的标定过程

Fig.8 Calculate procedure of the optical tracking system

实验采用被动式光学跟踪设备进行运动跟踪, 四个固定于头盔之上的涂覆近红外波长反射材料的小球构成空间立体结构, 标识使用者的位置和姿态, 四台 OptiTrack Flex 13^[19]系列 CCD 摄像机构成多视角摄像机阵列, 摄像机分辨率为 1280×1024 像素, 帧率为 120 fps, 视距为 12.2 m。

图 9 简化描述了被动红外动作捕捉设备的工作过程, 系统中动作捕捉设备坐标系 D 为世界坐标系, 其在设备安装后即固定不变。标定架坐标系 C 、初始头部坐标系 H_I 至动作捕捉设备坐标系 D 之间的变换关系 $T_{C \rightarrow D}$ 、 $T_{H_I \rightarrow D}$ 在用户标定时通过跟踪设备进行测量得知。

记初始头部坐标系 H_I 至运动头部坐标系 H_M 之间的变换关系为 τ_3 , 通过跟踪设备对用户进行实时测量可得知 $\tau_3 = T_{H_I \rightarrow D}^{-1} T_{H_M \rightarrow D}$ 。

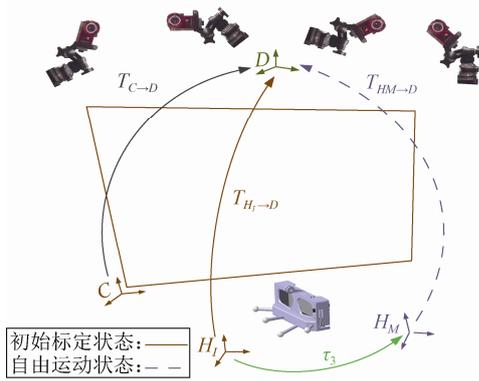


图9 光学追踪系统的工作示意图
Fig. 9 Working diagram of the optical tracking system

3.2 视线向量起点与终点的描述

瞳孔作为视线向量的起点,其在头盔坐标系中的局部坐标为 $P = \tau_1[x \ y \ z \ 1]^T$; 在自由运动状态下,其世界坐标为: $P' = T_{H_M \to D} \tau_1[x \ y \ z \ 1]^T$.

虚拟注视点 S 位于虚拟标定平面之上,在使用者完成标定至自由运动前,虚拟标定平面与真实标定平面重合。在使用者自由运动时,虚拟标定平面跟随使用者头部进行同样的运动变换 τ_3 ,此时虚拟注视点 S 的世界坐标为: $S' = S \tau_3$ 。

4 基于双视线向量的三维注视点定位

4.1 回归模型的参数估计

记 $\tau_2(p)$ 为位于头盔局部坐标系中瞳孔的坐标和虚拟标定平面 Π_V (初始状态下 Π_V 与 Π_C 重合) 之间的点存在的二映射关系,该映射关系需要在瞳孔摄像机和头部的相对位置发生变动之后进行标定。若使用者瞳孔中心处在头盔局部坐标系中坐标为 $P = [x_p \ y_p \ z_p \ 1]^T$ 位置时,对应注视虚拟标定平面上点 $S = [x_s \ y_s]^T$ 。由于眼球运动遵循眼外肌的协同约束,坐标 P 中存在冗余信息 Z_p 。故 $\tau_2(p)$ 被描述为如下二次非线性方程:

$$\begin{cases} x_s = a_0 + a_1 x_p + a_2 y_p + a_3 x_p y_p + a_4 x_p^2 + a_5 y_p^2 \\ y_s = a_6 + a_7 x_p + a_8 y_p + a_9 x_p y_p + a_{10} x_p^2 + a_{11} y_p^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a_0 \sim a_{11}$ 均为未知的多项式系数,求解12个系数至少需要6个标定点到提供12个约束。

标定点越多标定误差会越小,但均衡考虑耗时间问题、使用者难以长时间集中注意力以及标定点的均匀分布等问题,实验采用九点标定来求取映射关系 $\tau_2(p)$ 的最小二乘解。图10所示为瞳孔中心与注视点之间的二维映射模型的示意图。

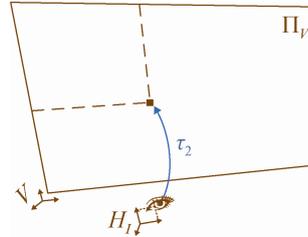


图10 瞳孔中心与注视点之间的二维映射模型
Fig.10 2D mapping model between the pupil center and the gaze point

4.2 回归模型的三维扩展

为了求得使用者在运动状态下的真实注视点 F 的坐标,首先假定使用者仍处于初始标定状态,由前述关系可知此时瞳孔在头盔坐标系中的坐标为: $P = \tau_1[x \ y \ z \ 1]^T$ ($[x \ y \ z \ 1]^T$ 由 Leap Motion 测得),对应的注视点为: $S = \tau_2(P) = \tau_2(\tau_1[x \ y \ z \ 1]^T)$ 。然后考虑使用者的自由运动对上述空间点的影响,如图11中虚线框所示,由于头戴式设备和假想的虚拟标定平面均跟随使用者做以 τ_3 表示的相同的运动变换,故此式:

$$P' = \tau_3 \tau_1[x \ y \ z \ 1]^T \quad (2)$$

$$S' = \tau_3 S = \tau_3 \tau_2(P) = \tau_3 \tau_2(\tau_1[x \ y \ z \ 1]^T) \quad (3)$$

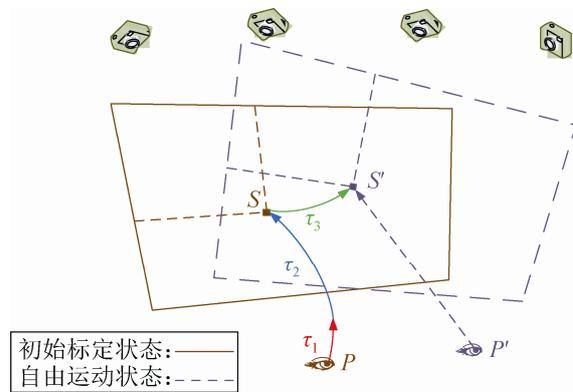


图11 回归模型的三维扩展
Fig. 11 Extend the regression model into 3D condition

连接空间点 P' 与 S' 即构成了使用者的视线向量。至此二维回归模型被扩展至三维空间内, 依据使用者的瞳孔中心坐标和二维回归模型即可得到使用者的空间视线向量。

4.3 三维注视点的求取

在获得使用者双眼的视线向量之后, 求取两条空间向量的交点即为使用者的注视点。由于追踪误差和计算误差的存在, 两条空间向量常处于异面状态, 此时取两条异面向量公垂线段的中点作为使用者的注视点, 如图 12 所示。至此求得了使用者在自由运动状态下的注视点的坐标。

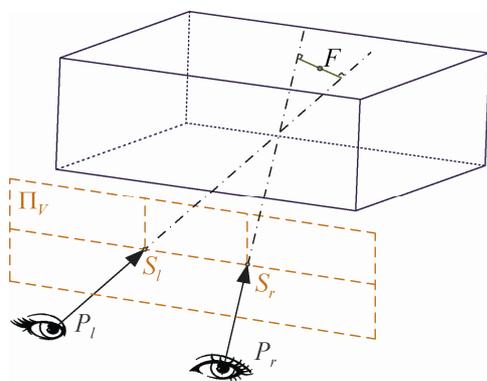


图 12 三维注视点的求取
Fig. 12 Calculate the 3D eye gaze point

5 系统实验与分析

5.1 应用实验

实验在尺寸约为 3.0 m×3.2 m×2.0 m 的 CAVE 环境内进行, CAVE 上方架设有被动红外光学运动捕捉设备, 运行平台为配置有 Intel Core(TM) 3.20 GHz CPU 和 4.00 GB 内存的计算机, 使用者自由运动空间为 3.0 m×3.2 m×2.0 m。在本系统中, 瞳孔中心提取的帧率为 100 Hz, 与其并行的头部运动追踪设备的帧率为 120 fps。实验结果显示三维视线追踪的算法的运行频率约为 60 Hz, 优于 NTSC 制式中 30 Hz 和 PAL 制式中 25 Hz 的标准, 达到了实时性的要求。

在 CAVE 环境中, 打开分时立体镜片, 即可基于本文所述的三维视线追踪算法得到使用者位于

沉浸式环境中的三维注视点, 依据使用者的三维注视点可以执行基于注视深度的景深调整, 以增强使用者的沉浸感并降低使用者的视觉疲劳; 也可以执行基于注视点的自然人机交互。由于本实验超出本文所述范围, 故不再详细叙述, 图 13 所示为应用实验过程中的情形。



图 13 三维视线追踪应用实验
Fig. 13 Experimental application of the 3D eye gaze tracking system

5.2 误差分析

为了测试算法的稳定性和精确性, 在上述相同实验环境中对多个受试者的视线估计效果进行了测试, 每个受试者进行两次实验: 第一次为在标定完成之后, 受试者保持头部位姿固定的情况下进行统计; 第二次为在标定完成之后, 受试者在工作空间内进行自由移动之后进行统计。使用者依次注视预定义的九个点时, 分别记录使用者视线落点坐标的估计值, 在每个预定义点进行 30 次视线落点估计, 共统计 540 个视线落点坐标值。实验过程中, 结果实时呈现于空间前方的物理尺寸为 3.2 m×2.0 m 的背投显示屏幕上, 图 14~15 所示分别为静止和自由运动状态下的三维视线追踪精度测试实验过程。

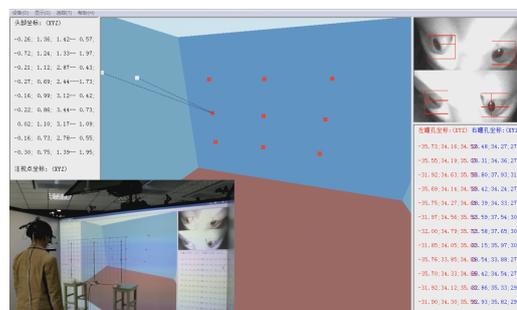


图 14 静止状态下的三维视线追踪精度测试实验
Fig. 14 Accurate measuring test for the 3D eye gaze tracking in static condition

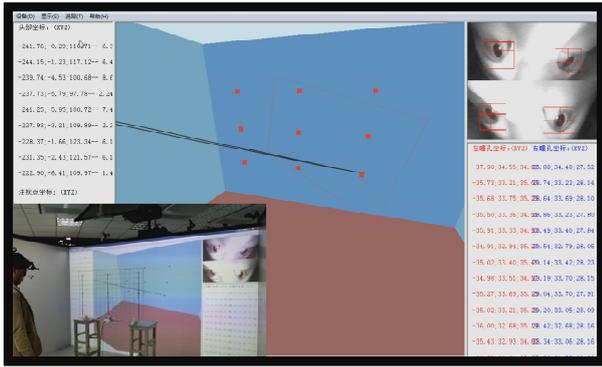


图 15 自由运动状态下的三维视线追踪精度测试实验
Fig. 15 Accurate measuring test for the 3D eye gaze tracking in free movement condition

计算视线落点坐标的均方根误差,结果显示在头部保持位姿固定的情况下,视线落点与预定义点在三个维度的平均均方根误差为 17.737 mm;在标定完成后使用者进行运动后而保持头部静止情况下,其三个维度的平均均方根误差为 44.167 mm。图 16~17 所示为对第 3 位使用者进行两次测试的结果。详细的误差测试结果如表 1 所示。

表 2 从理论方法、工作空间、估计精度和实时性等方面对允许使用者进行头部自由运动的视线追踪技术的国内外研究情况做出了对比。表中数据一方面表明了在大屏幕显示系统或沉浸式显示环境中,大工作空间、人体自由运动状态下的视线追踪与交互问题少有学者进行研究;另一方面表明了本文所述的头盔式三维视线追踪系统具有可行性和先进性。

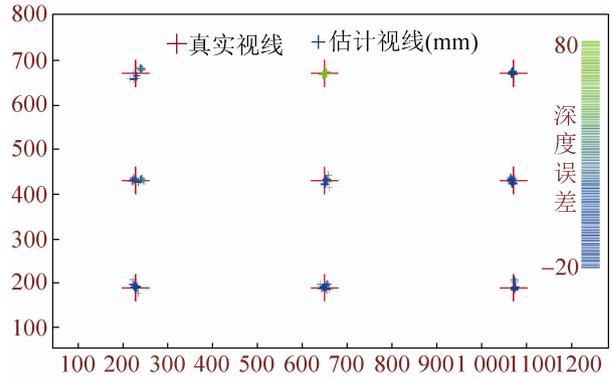


图 16 头部静止状态下的视线追踪结果
Fig. 16 Eye gaze tracking result with head fixed

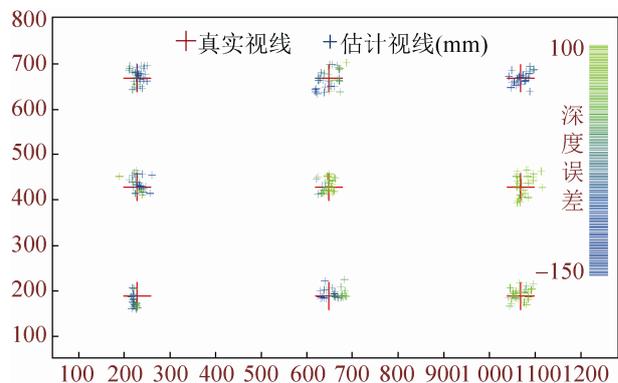


图 17 头部自由运动状态下的视线追踪结果
Fig. 17 Eye gaze tracking result with head free to move

表 1 视线追踪在三个维度的均方根误差 (单位:mm)
Tab. 1 Square root errors of the eye gaze tracking method in three dimensions

头部状态	X 方向	Y 方向	Z 方向	平均误差
静止状态	6.474	6.214	40.523	17.737
运动状态	15.360	16.566	100.574	44.167

表 2 几种视线追踪技术的对比

Tab. 2 Comparison between several eye gaze tracking methods

作者	年份	方法	工作空间	估计精度	实时性
Zhiwei Zhu	2007	三维建模(双相机双光源)	200×200×300 mm	水平:1.14° 竖直:1.58°	25 fps
XuehanXiong	2014	三维建模(Kinect)	距 Kinect 600-800 mm	2°左右	10 fps
Li Sun	2015	三维建模(Kinect)	300×300×200 mm	1.4~2.7°	12 fps
Qiang Ji	2003	二维映射(人工神经网络)	(4×5inches)×1.5 feet	5°	20 Hz
Zhiwei Zhu	2006	二维映射(支持向量机)	150×150×200 mm	1.5°	-
本文		侵入式二维映射	3.0×3.2×2.0 m	44.2 mm	60 Hz

6 结论

沉浸式环境中人机交互受到指点式设备和数

据手套的窄带宽输入界面的限制,输入与输出效率变得越来越不平衡,利用所有可能的信息通道进行自然人机交互,提高交互的自然性和高效性,探索

自然和谐的人机关系已成为计算机科学研究的一个越来越重要的领域。本文将运动追踪设备和瞳孔追踪设备相结合, 创新性提出利用三维视线跟踪设备实现沉浸式环境中感兴趣区域选取等功能, 解放使用者的双手, 为解决自由运动状态下沉浸式环境中人机自然交互问题提出了一个较好的思路。

但是由于人体运动的随意性、眼动存在固有的抖动和眨动、米达斯接触(Midas Touch)、眼睛的疲劳等问题, 使得把注视焦点与空间元素相关联时存在困难, 另外, 视觉通道只有和其它通道(如听觉等)配合才能发挥更大的作用, 故提出合理的多通道整合模型和算法, 设计一款符合人机工效学原理轻便实用的自然交互式头盔仍存在巨大的挑战。

参考文献:

- [1] Hansen D W, Ji Q. In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* (S0162-8828), 2010, 32(3): 478-500.
- [2] Yoo D H, Chung M J. A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion[J]. *Computer Vision and Image Understanding* (S1077-3142), 2005, 98(1): 25-51.
- [3] Zhang Z, Cai Q. Improving cross-ratio-based eye tracking techniques by leveraging the binocular fixation constraint[C]// *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. ACM, 2014: 267-270.
- [4] Shin Y G, Choi K A, Kim S T, et al. A novel 2-D mapping-based remote eye gaze tracking method using two IR light sources[C]// *Consumer Electronics (ICCE)*, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 190-191.
- [5] Zhu Z, Ji Q, Bennett K P. Nonlinear eye gaze mapping function estimation via support vector regression[C]// *Pattern Recognition*, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on. IEEE, 2006: 1132-1135.
- [6] Gneo M, Schmid M, Conforto S, et al. A free geometry model-independent neural eye-gaze tracking system[J]. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* (S1743-0003), 2012, 9(1): 82.
- [7] Zhu Z, Ji Q. Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement[J]. *IEEE Transactions on biomedical engineering* (S1558-2531), 2007, 54(12): 2246-2260.
- [8] Chen J, Tong Y, Gray W, et al. A robust 3D eye gaze tracking system using noise reduction[C]// *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications*. ACM, 2008: 189-196.
- [9] Sun L, Liu Z, Sun M T. Real time gaze estimation with a consumer depth camera[J]. *Information Sciences* (S0020-0255), 2015, 320: 346-360.
- [10] Xiong X, Cai Q, Liu Z, et al. Eye gaze tracking using an RGBD camera: a comparison with a RGB solution[C]// *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*. ACM, 2014: 1113-1121.
- [11] Hou W, Ding Y, Qin X, et al. Evaluation of Cognitive Awareness Based on Dual Task Situation[C]// *International Conference on Human Centered Computing*. Springer, Cham, 2016: 160-171.
- [12] McMurrough C, Conly C, Athitsos V, et al. A mobile, low-cost headset for 3D point of gaze estimation[J]. *International Journal of Advanced Computer Science* (S1819-9224), 2014, 1(1): 2-5.
- [13] Marin G, Dominio F, Zanuttigh P. Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices[C]// *Image Processing (ICIP)*, 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 1565-1569.
- [14] Weichert F, Bachmann D, Rudak B, et al. Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller[J]. *Sensors* (S1424-8220), 2013, 13(5): 6380-6393.
- [15] Guna J, Jakus G, Pogačnik M, et al. An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking[J]. *Sensors* (S1424-8220), 2014, 14(2): 3702-3720.
- [16] Shao G, Che M, Zhang B, et al. A novel simple 2D model of eye gaze estimation[C]// *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 2010 2nd International Conference on. IEEE, 2010, 1: 300-304.
- [17] Li D, Winfield D, Parkhurst D J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops*, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2005: 79-79.
- [18] Zhu Z, Ji Q. Eye gaze tracking under natural head movements[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2005: 918-923.
- [19] Chambers T L, Aglawe A, Reiners D, et al. Real-time simulation for a virtual reality-based MIG welding training system[J]. *Virtual Reality* (S1359-4338), 2012, 16(1): 45-55.