

文章编号:1007-2780(2019)02-0215-05

基于视觉空间定向理论的虚拟现实空间重构

夏振平^{1, 2*}, 胡伏原^{1, 2}, 程 成¹, 顾敏明¹

(1. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

2. 苏州市虚拟现实智能交互及应用技术重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 立体视觉中, 虚拟的中央眼是立体空间定向的依据。中央眼存在个体差异, 然而现有虚拟现实技术在立体影像呈现过程中尚未考虑到中央眼的个体差异。模拟的射击实验结果表明, 人眼视觉系统对立体空间中, 物体之间相对方向的判断极其敏感, 实际中央眼位置与理想情况之间的微小偏移会带来显著性的感知差异。虚拟现实技术模拟真实场景的拟真性和交互性可以通过考虑个体中央眼位置的方式进行提升。本文通过对人眼双目定向理论的分析, 提出了基于中央眼位置的虚拟空间重构方法, 采用对立体相机系统反方向平移的方法补偿由于中央眼偏移带来的偏差。所提出的方法有望为虚拟现实技术拟真性和交互性的提升提供理论依据。

关键词: 虚拟现实; 中央眼; 空间定向; 空间重构

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193402.0215

Virtual reality space reconstruction based on visual space orientation theory

XIA Zhen-ping^{1, 2*}, HU Fu-yuan^{1, 2}, CHENG Cheng¹, GU Min-ming¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Virtual Reality Key Laboratory of Intelligent Interaction and Application Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

Abstract: In the binocular vision, the virtual cyclopean eye is the reference center for stereo space orientation. There is difference between the cyclopean eye locations of different users, which is not considered in the virtual reality system when presenting the stereo images. The results of shooting simulation experiment showed that the human vision system is sensitive to the relative visual direction offset, and the slight difference between ideal and actual cyclopean eye locations will lead to significant

收稿日期: 2018-09-23; **修订日期:** 2018-12-24.

基金项目: 国家留学基金委项目 (No. 201704515003); 苏州市 2016 年度第六批科技发展计划 (No. SZS201609); 江苏省社会发展项目 (No. BE2017663)

Supported by China Scholarship Council (No. 201704515003); Sixth Group of Science and Technology Development Plan of Suzhou in 2016 (No. SZS201609); Social Development Project of Jiangsu Province (No. BE2017663)

* 通信联系人, E-mail: xzp@usts.edu.cn

perception difference. The vividness and interactivity of virtual reality system can be improved through considering the exact cyclopean eye location of the user. This paper analyzed the binocular visual direction computation theory, and proposed a virtual space reconstruction method based on the actual cyclopean eye location of specific user. The deviation brought by the cyclopean eye location shift is compensated by the opposite direction shift of the stereo camera system. The proposed method may provide theoretical reference for improving the vividness and interactivity of the virtual reality system.

Key words: virtual reality; cyclopean eye; space orientation; space rectification

1 引言

归功于虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术的迅速发展,计算机模拟的虚拟世界越来越逼真。VR技术超越了传统的交互手段,使人们可以更加直接地与计算机互动,以解决更加复杂的问题。因此,VR技术在娱乐、教育、医疗、军事、科学研究等领域得到了广泛的应用^[1]。在所有的VR应用场景当中,沉浸式的感受至关重要^[2]。实现沉浸式体验最重要的是增强生动性和交互性。生动性是指媒体技术如何全面地给用户呈现模拟的环境。交互性是指用户可以实时、准确地对媒体技术呈现的场景进行作用和修正^[3]。大规模的商业投资使得虚拟现实技术水平不断提升的同时,价格也降低到消费级的水平。尽管如此,虚拟现实技术中还有大量的问题需要研究和解决,以进一步提高VR技术的生动性和交互性^[4]。

对于自我所处位置的意识,在真实世界和虚拟世界的体验中都很重要。三维空间中物体的感知,需要确定物体相对自我所处的距离和方向。距离信息来源于双眼视网膜上同一物体的视差信息,以及其他诸如阴影、相对大小、遮挡等单眼深度线索^[5]。双目视觉下的方向判断依赖于双眼视线方向信息,最终融合成单一的双目视觉方向信息。双目视觉下的视觉方向计算对立体空间感知和物体形状感知尤其重要^[6]。对于自我位置的意识基于人的中央眼的位置。中央眼是一个虚拟眼,它是双目视觉下判断物体相对自身方位的参考点^[7]。由于人的双眼功能通常情况下不可能完全一致,因此中央眼的位置在双眼中间位置附近,并且存在个体差异^[8]。目前,虚拟现实技术中简单假设了中央眼的位置位于双眼连线的中心位置,没有考虑用户存在的个体差异^[9]。这种理想假设与实际情况的差异会导致不同用户感知体验

存在差异,同时会产生用户与VR设备的交互冲突。

本文基于双目视觉下空间定位的原理,提出了基于中央眼的虚拟现实场景重构方法,试图解决个体视觉特性差异带来的交互冲突。

2 基于视觉的空间定向

视觉空间中一个物体的绝对视觉方向主要依赖于两点:(1)由左右眼视网膜提供的眼中心方向信息;(2)左右眼的注视方向。图1是立体视觉空间定向的几何结构示意图。双眼注视点F的同时点P也在视野范围内,在左右眼视网膜上点P相对于注视点F的眼中心方向分别用 θ 和 φ 表示。虚拟的中央眼是双目视觉下相对方向的判断基准,又称为双目视觉方向中心和自我中心。双目视觉下,点P相对于注视点F的眼中心方向用 γ 表示。

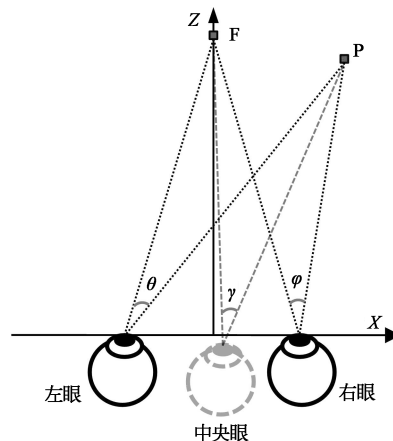


图1 立体视觉空间定向的几何结构

Fig.1 Geometric construction of visual space orientation

中央眼的位置存在个体差异,是眼优势^[10]的一种表现形式。如果在双目视觉方向判断上

左眼更占优势,则中央眼更靠近左眼,反之亦然。与左右手的使用情况类似,有2/3左右的人中央眼更靠近右眼,即右眼在双目方向判断上更占优势。在双眼连线方向上,中央眼的位置通常向优势眼偏移0~1 cm。因为人眼视觉系统对物体相对位置偏移的分辨精度已经超越了视网膜上感光细胞的分布精度,其对位置的微小变化极其敏感,微小的偏移会影响相对位置的判断。游标卡尺就是依据这个原理发明的,利用人眼的这一特性提高测量的精度。立体空间的相对位置判断虽然会受到深度不同的影响,但还是达到了极高的灵敏度^[11]。研究表明,立体空间中不同深度的物体相对位置偏移敏感度阈值达到了34 arc sec^[12]。

3 基于视觉感知的交互

VR技术中,立体显示技术是最关键的信息交互媒介,承载着从计算机向用户的视觉信息传递。用户再根据接受到的视觉信息,向计算机反馈信息。要达到准确的信息交互,不但要了解计算机的立体影像呈现方式,而且要厘清特定用户的视觉感知方式。

基于视觉感知的交互中,一个典型的例子就是第一人称下的射击游戏。玩家需要根据感知到的视觉信息瞄准射击,计算机要根据玩家的射击数据进行是否命中目标的反馈。现有VR系统大多使用红外线瞄准,仅仅作为游戏貌似问题不大,但有些特殊的情况下就不适用了。有一种不能使用红外线瞄准的飞碟射击场景,为了迅速准确地判断目标的飞行速度和距离,射手需要在双目视觉下瞄准目标并射击。不管是使用VR作为游戏平台还是训练的手段,都希望VR系统能够真实、准确地模拟真实场景下的情形。因此,准确掌握特定玩家的立体视觉空间定位信息尤为重要。

VR用户的立体视觉空间定位信息指的是中央眼的位置。在VR系统不了解用户中央眼位置时,VR系统默认理想情况下中央眼的位置位于双眼位置的中间,称之为“理想”情况。对用户进行中央眼测试获得的中央眼位置称为“实际”情况。图2展示了4位受测者参与的模拟射击测试结果。实验首先测试了受测者的中央眼位置(表1),然后让受测者参与模拟射击实

验。为保持对称性,目标分布在对称的左右15°视角位置,对应图2中每个受测者的左半图和右半图。目标位置固定,瞄准器位置由实验程序随机呈现,受测者判断瞄准器是否瞄准了目标,如果是就按下射击键,否则变换位置继续瞄准。每个受测者对每个目标都有上百个射击的机会,所有成功射击(按下射击键)的数据都被记录下来。分别根据“理想”和“实际”情况下中央眼的位置,计算射击点的视角和目标视角的偏差,计算结果的平均值和标准差如图2所示。同时,“理想”和“实际”情况之间差异的显著性等级也用“*”号标识出来。结果表明,中央眼的位置偏移(理想情况为双眼的中央位置)对场景中物体相对位置的判断具有显著性的影响。如果不考虑用户特定的立体空间定向信息,VR系统与用户互动时将产生冲突。

除了互动冲突以外,具有不同中央眼位置的用户观看同一立体影像内容时因为是从不同视角观看,其感受也不同,这和内容设计者的初衷也不一致。

表1 中央眼相关测试数据

Tab.1 Testing results of cyclopean eye

Subject #	X/cm	Z/cm	IPD/cm
1	0.57	-1.17	6.4
2	0.25	-1.94	6.1
3	0.46	-1.57	6.8
4	0.65	-1.16	6.6

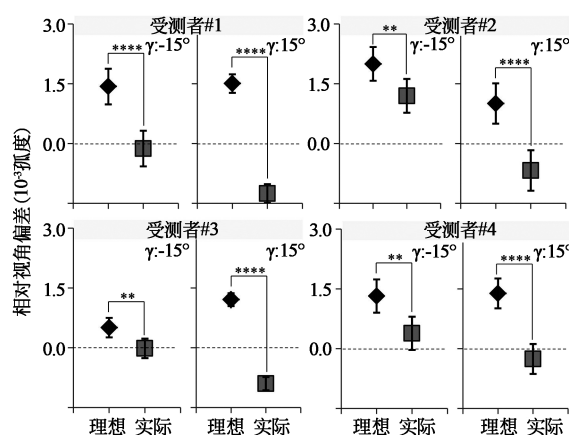
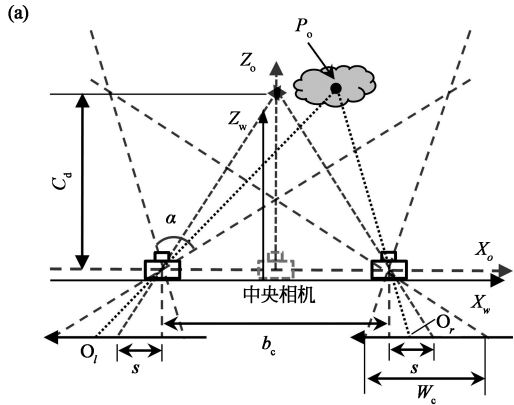


图2 比较理想和实际情况下射击误差的判断差异
Fig.2 Shooting error judgment difference between ideal and actual situations

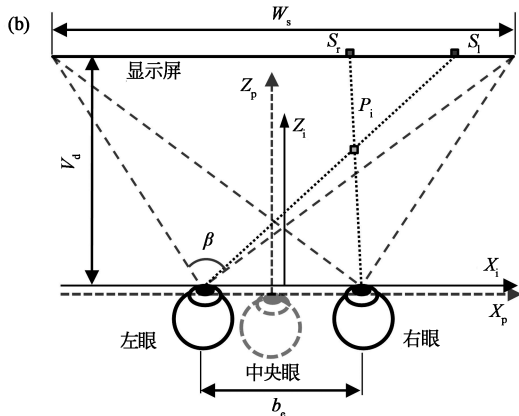
4 虚拟空间重构

为了解决因不同用户中央眼位置不同造成的 VR 系统与用户的互动冲突,以及不同用户感知内容不同的问题,本文提出了一种基于中央眼的虚拟空间校正方法。如图 3 所示,虚拟现实系统的虚拟空间构建经历了立体影像获取、立体影像呈现和虚拟空间感知的过程。首先,真实世界或计算机模拟的世界空间(X_w, Y_w, Z_w)场景(图 3(a))中的物点 P_o 分别投射到左右相机的感光元件上形成 O_l 和 O_r ,该投射在物体空间(X_o, Y_o, Z_o)进行。然后, O_l 和 O_r 分别呈现在立体显示屏平面对应的 S_l 和 S_r 位置(图 3(b))。最后,双眼图像融合后呈现在图像空间(X_i, Y_i, Z_i)的 P_i 位置。



(a) 立体影像获取

(a) Stereoscopic content acquisition



(b) 立体影像呈现与感知

(b) Stereoscopic content presenting and perception

图 3 虚拟现实技术影像获取、呈现与感知过程。

Fig.3 The content acquisition, display and perception of virtual reality.

因立体空间定向依据中央眼的位置,因此在图像空间以中央眼为原点建立了感知空间(X_p, Y_p, Z_p)。感知空间直接代表了特定用户的主观感知角度。所有空间定向在感知空间进行。类似中央眼的概念,本文提出了中央相机的概念。由于左右相机的性能几乎完全一致,虚拟的中央相机位于两个相机的连线中心位置。中央相机刚好位于物体空间的原点,中央相机的定义是为了更直接地表明物体空间与世界空间的平移关系。

图像空间和感知空间之间是直接的平移关系,如式(1)所示。其中 $[x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T$ 是中央眼在图像空间的位置坐标。

$$[X_p, Y_p, Z_p]^T = [X_i, Y_i, Z_i]^T - [x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T. \quad (1)$$

类似地,物体空间和世界空间也存在简单的平移关系,如式(2)所示。其中, $[x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T$ 是中央相机在世界空间的位置坐标。

$$[X_o, Y_o, Z_o]^T = [X_w, Y_w, Z_w]^T - [x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T, \quad (2)$$

为了简化表述,本文暂不考虑因立体影像获取与显示过程中的参数不匹配所导致的空间畸变问题^[13]。相关参数完美匹配的情况下,图像空间与物体空间一致(如式(3)所示)。

$$[X_i, Y_i, Z_i]^T = [X_o, Y_o, Z_o]^T, \quad (3)$$

本文最终的目的是使所有用户从同一视角看到同一空间场景,即感知空间与世界空间一致(如式(4)所示)。在此前提下 VR 系统与用户的交互也将不存在冲突。

$$[X_p, Y_p, Z_p]^T = [X_w, Y_w, Z_w]^T, \quad (4)$$

最终,根据式(1)~(4)可以推导出式(5)。中央相机的位置依据中央眼在图像空间的位置偏移,向相反方向偏移相同的偏移量。

$$[x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T = -[x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}]^T, \quad (5)$$

5 结 论

立体视觉中,虚拟的中央眼是立体空间定向的依据。中央眼位置存在个体差异,现有虚拟现实技术在立体影像呈现过程中尚未考虑到中央眼的个体差异。理想情况下,中央眼位于双眼连线的中央位置,而一般人中央眼都有些许的偏移。立体空间中,人眼对物体之间相对方向的判断极

其敏感,中央眼的微小偏移会带来显著性的感知差异。虚拟现实技术模拟真实场景的拟真性和交互性可以通过考虑个体中央眼位置的方式进行提

升。本文提出了基于中央眼位置的虚拟空间重构方法,采用对立体相机系统反方向平移的方法补偿由于中央眼平移带来的偏差。

参 考 文 献:

- [1] 任国印,吕晓琪,杨楠,等.心脏体素化三维模型感兴趣血管交互式显示方法研究[J].液晶与显示,2018,33(5): 433-442.
REN G Y, LV X Q, YANG N, *et al.* Interactive display methods of vessel of interest within voxelized three-dimensional cardiac model [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(5): 433-442. (in Chinese)
- [2] LOOMIS J M. Presence in virtual reality and everyday life: immersion within a world of representation [J]. *Presence*, 2016, 25(2): 169-174.
- [3] STEUER J. Defining virtual reality: dimensions determining telepresence [J]. *Journal of Communication*, 1992, 42(4): 73-93.
- [4] INTERRANTEV, HÖLLERER T, LÉCUYER A. Virtual and augmented reality [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2018, 38(2): 28-30.
- [5] REICHELT S, HÄUSSLER R, FÜTTERER G, *et al.* Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays [J]. *SPIE*, 2010, 7650:76900B.
- [6] VAN DE GRIND W A, ERKELENS C J, LAAN A C. Binocular correspondence and visual direction [J]. *Perception*, 1995, 24(2): 215-235.
- [7] JIN L N, BOEV A, EGIJAZARIAN K, *et al.* Quantifying the importance of cyclopean view and binocular rivalry-related features for objective quality assessment of mobile 3D video [J]. *Journal on Image and Video Processing*, 2014, 2014: 6.
- [8] BARBEITO R, ONO H. Four methods of locating the Egocenter: a comparison of their predictive validities and reliabilities [J]. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 1979, 11(1): 31-36.
- [9] TURSKI J. On binocular vision: The geometrichoropter and Cyclopean eye [J]. *Vision Research*, 2016, 119: 73-81.
- [10] 顾升学,王琼华.优势眼在光栅 3D 显示中的影响[J].液晶与显示,2018,33(7):590-595.
GU S X, WANG Q H. Influence of dominant eye in three-dimension lenticular display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(7): 590-595. (in Chinese)
- [11] HOU C, KIM Y J, VERGHESE P. Cortical sources of Vernier acuity in the human visual system: an EEG-source imaging study [J]. *Journal of Vision*, 2017, 17(6): 2.
- [12] HEINRICH S P, KROMEIER M, BACH M, *et al.* Vernier acuity for stereodisparate objects and ocular prevalence [J]. *Vision Research*, 2005, 45(10): 1321-1328.
- [13] WOODS A, DOCHERTY T, KOCH R. Image distortions in stereoscopic video systems [J]. *SPIE*, 1993, 1519: 36-49.

作者简介:



夏振平(1985—),男,江苏兴化人,博士,讲师,哈佛大学博士后,主要从事视觉相关的立体显示图像质量测量、评价和优化方面的研究。E-mail:xzp@usts.edu.cn