

平行式红外双目立体系统各参数合理效益取值

汪同浩,刘秉琦,黄富瑜,陈一超,张 帅

(军械工程学院 电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘 要:为解决当前夜间辅助驾驶仪平面显示的弊端以及在合理效益下获得丰富的立体层次感,文中从平行式红外双目夜视系统出发分析对比了红外双目系统和人眼立体感知的最小可分辨距离,结合人眼立体感知机理以及从影像分层角度分析观看立体影像时兼具宽阔的视场张角、丰富的立体层次感时所满足的条件,对红外双目立体系统合理效益条件下的各参数关系进行推导。最后根据推导结果,计算分析 3 种不同规格显示屏所对应的水平像素数的合理效益取值,并选择 5 组不同水平像素数的红外立体图像对进行实验验证。结果表明:根据推导结果搭建的红外夜视系统在让观察者获得较大视场张角的同时还兼顾效益。

关键词: 辅助驾驶; 红外双目系统; 影像分层; 合理效益

中图分类号: TN949.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0904004

Reasonable benefit value of the parameters of the parallel infrared binocular stereo system

Wang Tonghao, Liu Bingqi, Huang Fuyu, Chen Yichao, Zhang Shuai

(Department of Electronics and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of the nighttime auxiliary driving plane display and obtain rich 3D layering under reasonable benefit, based on the parallel infrared binocular night vision system, the minimum resolution distance of the infrared binocular system and the human eye stereoscopic perception was analyzed. Combined with the mechanism of stereo-perception of the human eye and the condition of viewing the 3D image with large angle of view and rich 3D layering from the image hierarchy, the parameters of the infrared binocular stereo system were deduced. Finally, according to the results of the derivation, the reasonable benefit of the horizontal pixels corresponding to three different specifications display was calculated and analyzed, and five sets of infrared images with different horizontal pixels were selected for experimental verification. The results show that the infrared night vision system based on the results of the derivation not only allows the observer to obtain a larger field of view, but also takes effect.

Key words: auxiliary driving; infrared binocular system; image hierarchy; reasonable benefit

收稿日期:2017-01-13; 修订日期:2017-02-24

基金项目:军内科研项目

作者简介:汪同浩(1993-),男,硕士生,主要从事光电对抗方面的研究。Email: m18056432832c@163.com

导师简介:刘秉琦(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。Email: whelmmail@sina.com

0 引言

战场环境复杂多变,烟雾灰尘、恶劣天气、复杂地形等不利因素给战车驾驶带来很大不便,严重影响了战场夜间的机动化行进以及武器装备的战时性能发挥。伴随着信息技术的发展,一种兼具全天候、全被动、隐蔽性好、穿透性强等优势的红外夜视技术应运而生^[1]。随着该技术逐渐走向成熟,20世纪90年代中期开始用于战车驾驶^[2]。其中,长波红外相较于短波红外成本较低,维护方便,不易受阳光干扰等优点广泛应用于车辆夜间辅助驾驶。例如美军的布雷德利战车,中国最新的99A2型坦克等都配备了长波红外夜视辅助驾驶系统。

当前的夜间辅助驾驶系统大都通过置于车体外的红外相机捕捉车体外的景物信息,然后将捕获的信息实时显示在驾驶舱的显示器上,以达到辅助驾驶的目的。然而,目前的夜间驾驶仪多采用单相机进行图像采集,因此显示器中显示的图像只是单一的二维图像,缺乏纵深感。这就导致驾驶员很难判断景物的前后关系以及相对位置,不利于战车行进。因而发展红外双目夜视系统就显得尤为重要,而获取舒适的立体观影感受则成为红外立体显示系统搭建的重要一步。

为了获得兼具宽阔的驾驶视场张角,丰富的立体观影层次感以及实现效益的最大化,文中从红外双目系统以及人眼的立体感知误差方面进行分析,并从立体影像分层^[3]角度对合理效益下各参数的定量关系进行推导。最后通过平行式红外双目图像采集装置^[4]以及虚拟现实(VR)显示装置验证了推导结果的正确性。

1 人眼及红外双目系统的立体感知机理

1.1 双目系统基线长度的限定

在观察3D立体图像时,水平视差是影响立体感受的主要因素之一^[5]。文中采用平行式的双目立体系统来获取物体的三维信息。

如图1所示, θ 为相机的水平视场角, b 平行双目系统的基线长度。假设距离系统前 H 处有一目标,由几何关系可以得出^[6]该目标在双目系统中的水平视差为:

$$q = \frac{bm}{-2\tan(\theta/2) \cdot H} \quad (1)$$

式中: m 为荧幕的宽度。

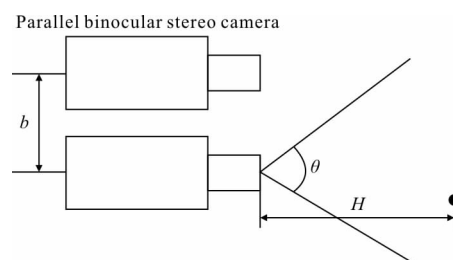


图1 平行式双目系统原理结构

Fig.1 Schematic of structure of the parallel binocular stereo system

当人眼观察具有视差的同一物点时便会产生立体感^[7]。如图2所示,物点在屏幕的左右像素点记为

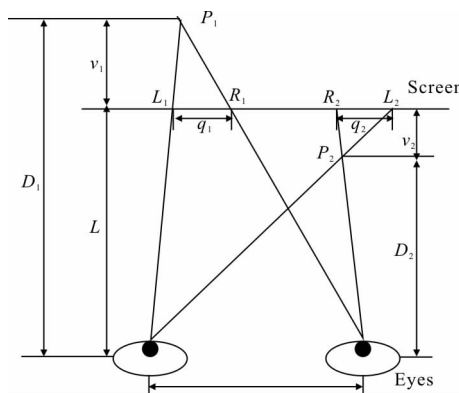


图2 人眼立体感知原理

Fig.2 Principle of human eye stereo perception

L 和 R 。当 L 位于 R 左侧时(如 P_1 点),此时人眼观察该物点位于屏幕后方,定义此时两像素点的视差为正;当 L 位于 R 右侧时(如 P_2 点),此时人眼观察该物点位于屏幕前方,定义此时两像素点的视差为负。由几何关系:

$$D = L \frac{e}{e - q} \quad (2)$$

式中: D 为人眼观察屏幕所获得的视在距离; q 为视差; L 为人眼到屏幕的距离; e 为双眼的瞳距,通常取65 mm。

由上式可以看出,视差越大,人眼获得的立体感越明显,纵深感越强。然而当视差 q 超过人眼的融合范围时,双眼将无法将其融合为单一影像,就会产生复视,从而丧失立体感,该融合区域称之为Panum融合区^[8]。实验表明,一般不能超过以下限制:

$$\frac{D'L}{D'+L\eta} < D < \frac{D'L}{D'-L\eta} \quad (3)$$

式中： D' 为人眼瞳孔的直径，取 4 mm； η 为人眼视觉锐度，通常取 $10'$ ^[9]。联立公式(1)、(2)、(3)可对基线长度 b 进行限定。

$$b < \frac{2eLH\eta \tan(\theta/2)}{D'm} \quad (4)$$

1.2 红外双目系统的最小可分辨距离

图 3 为世界坐标系下两相机的相对位置图，其

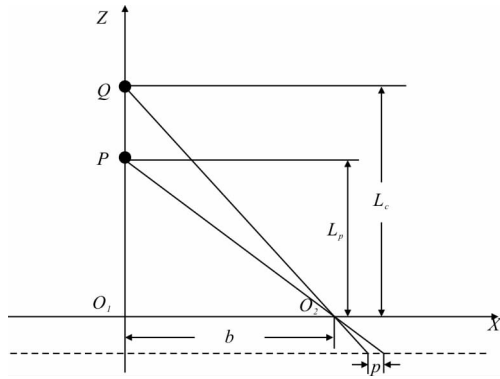


图 3 世界坐标系及相机位置

Fig.3 World coordinate system and camera position

中 O_1, O_2 分别代表两红外相机，为了计算方便，假设物点 P 和物点 Q 位于左相机光轴上，两物点距双目系统的距离分别为 L_p 和 L_c 。由几何关系可得出：

$$L_c - L_p = \frac{L_p^2 \cdot p}{bf - L_p \cdot p} \quad (5)$$

式中： p 为两物点在相机成像面存在的视差。当两物点在相机成像面存在一个像素时，此时两物点恰能被分辨^[10]，假设相机的像素宽度为 p_x ，两物点恰能分辨的距离为 d_1 ，则：

$$d_1 = \frac{L_p^2 \cdot p_x}{bf - L_p \cdot p_x} \quad (6)$$

定义显示表面的水平宽度 m 与相机成像面水平宽度 h 的比值为放映放大率，用 k 表示。则：

$$k = \frac{m}{h}, f = \frac{h}{2 \tan(\theta/2)} \quad (7)$$

将公式(4)取等号，联立公式(6)、(7)，取 $L_p = H$ 可得：

$$d_{1min} = \frac{HD'kp_x}{e\eta L - 2D'kp_x} \quad (8)$$

式中： d_{1min} 为人眼 Panum 融合区所允许的最大基线长度条件下对应的最小分辨距离。

1.3 人眼的立体感知误差

如图 4 所示，物体 B 在两网膜中的像分别为 b_L 和 b_R ，假设此时有一与物体 B 距离不等的物 A ，它在两网膜上的像分别为 a_L 和 a_R 。由于两者在网膜中的像不对应，即 $a_L b_L \neq a_R b_R$ ，这种微小的差别通过大脑分析处理便形成立体感受^[11]。

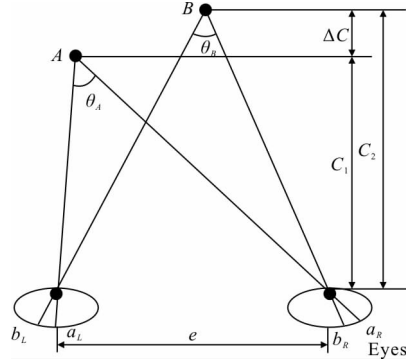


图 4 双目观察物体实例

Fig.4 Example of binocular observation

由几何关系可以得出：

$$\Delta\theta = \theta_A - \theta_B = \frac{e}{C_1} - \frac{e}{C_2} = \frac{e\Delta C}{C_1(C_1 + \Delta C)} \approx \frac{e\Delta C}{C_1^2} \quad (9)$$

由上式可知， $\Delta\theta$ 越大，人眼感知两物体的相对距离就越大； $\Delta\theta$ 越小，人眼感知两物体间的距离就越小。当 $\Delta\theta$ 小到人眼恰能分辨时，此时对应的 $\Delta\theta$ 值称之为“体视锐度”^[12]，记为 $\Delta\theta_{min}$ 。设此时感受的最小距离为 d_{2min} ，则：

$$d_{2min} = \frac{C_1^2 \cdot \Delta\theta_{min}}{e} \quad (10)$$

由于红外探测器分辨率低，因此在获取景物三维信息时，往往不能达到人眼的立体分辨精度。由于红外双目辅助驾驶系统设计的最终目的是为了夜间的车辆驾驶，以某型装甲车夜视系统为例，选取参数如下： $k=20, L=0.5$ m 将以上参数带入公式(8)、(10)，通过作图对比红外探测器与人眼所能分辨的最小距离，如图 5 所示。从图中可以看出人眼的分辨精度在一定范围内要高于红外双目相机的分辨精度，当到达一“临界点”时(点 Q)，此时人眼与红外双目相机的分辨精度相同；当超过该“临界点”后，红外双目的分辨精度将高于人眼，并随着距离增加两者差距逐渐增大。因此在分析获取体视效果最优值时，还应考虑系统自身参数。假设现通过平行式红外双目系统

采集 H 处景物的三维信息,根据公式(4)选择满足 Panum 融合区的基线长度 b_0 ,此时红外双目系统的立体感知误差为:

$$d_0 = \frac{2H_0^2 p_x \tan(\theta/2)}{b_0 h - 2H_0 p_x \tan(\theta/2)} \quad (11)$$

此时在临界点前距离内肉眼感受到的立体深度 $d_{2min}=d_0$,联立公式(10)、(11)取 $C_1=H_0$ 得出此时对应的体视锐度 $\Delta\theta'_{min}$ 为:

$$\Delta\theta'_{min} = \frac{2ep_x \tan(\theta/2)}{b_0 h - 2H_0 p_x \tan(\theta/2)} \quad (12)$$

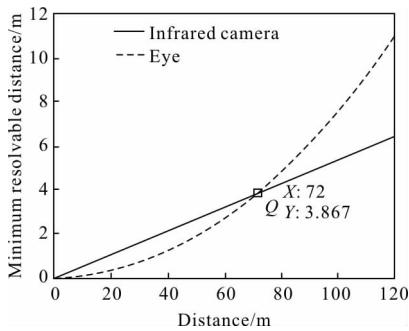


图 5 人眼与红外相机的最小分辨距离对比

Fig.5 Minimum resolvable distance comparison between human eye and infrared camera

由于在“临界点”前的这段距离是驾驶员识别路况的关键距离,因此文中只对临界点内的合理效益取值进行推导。在“临界点”之后红外双目系统的精度已高于人眼,此时按照 $\Delta\theta_{min}=10''$ 计算。

2 合理效益下各参数定量关系推导

如图 6 所示,当观察者处于最佳位置观看立体影像时,假设屏幕上有一物点 Q 位于两眼瞳距的垂直平分线上,双眼视轴对物点 Q 夹角为 θ_Q ;当观察屏幕中无穷远处的景物时,双眼视轴相互平行,此时对应的视轴夹角为 $\theta_\infty=0$ 。在观察屏幕后方的立体影像时,由于不同景物对人眼张角的不同,所以在实际观察中给人带来纵深感,称这种由人眼视觉感知的深度感为人眼的生理分层。定义如下:

$$N_1 = \frac{\theta_Q - \theta_\infty}{\Delta\theta_{min}} = \frac{\theta_Q}{\Delta\theta_{min}} = \frac{e}{L \cdot \Delta\theta_{min}} \quad (13)$$

由于红外探测器的分辨精度未能达到人眼的要求,所以要求 $\Delta\theta_{min}=\Delta\theta'_{min}$ 。联立公式(10)和(12),此

时的生理分层为:

$$N_1 = \frac{b_0 h - 2Hp_x \tan(\theta/2)}{2p_x L \tan(\theta/2)} \quad (14)$$

观察屏幕前方与后方景物具有相同的数学关系,此时的生理分层为负值,计算时取绝对值即可。

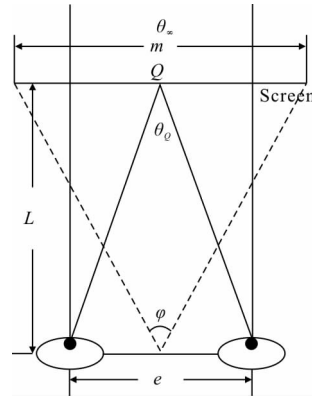


图 6 人眼观察立体影像示意图

Fig.6 Schematic of observing the stereo image

文中采用平行式的双目系统获取景物的三维信息,因此景物 z 方向的深度信息被单一地记录在水平方向视差图上,而 x 和 y 方向的信息却因系统的自身工作局限而被丢失。当观察 3D 影像时,观察者通过左右眼接收具有水平视差的影像来获取物体的三维信息,水平视差的不同,观察者所获得立体感受则不同。用 N_2 表示屏幕平面到其后无穷远处间的深度层数。称这种由放映设备等外界参数形成的立体分层为物理分层,用像素数来进行表示:

$$N_2 = \frac{e}{m} \cdot n \quad (15)$$

式中: m 为荧幕宽度; n 为荧幕影像的水平像素个数。在观看立体影像时,为了使观察者获得最佳的立体感受,应要保证生理分层与物理分层协调一致,即 N_2 应大于等于 N_1 。联立公式(14)和(15)可得:

$$\frac{e}{m} \cdot n \geq \frac{b_0 h - 2Hp_x \tan(\theta/2)}{2p_x L \tan(\theta/2)} \quad (16)$$

上式还可化简为:

$$\frac{L}{m} \geq \frac{b_0 h - 2Hp_x \tan(\theta/2)}{2enp_x \tan(\theta/2)} \quad (17)$$

由图 6 可得:

$$\frac{n}{\varphi} \geq \frac{1}{\Delta\theta'_{min}} \quad (18)$$

从合理效益上说,在获得较大视场张角以及丰

富立体层次感的同时也要兼顾效益,也就是要让 N_2 尽量趋于 N_1 , 即 $N_2=N_1$ 。其中 φ 为屏幕的水平视场张角。将上式取等号, 此时对应 φ, n 值所得到的立体影像, 在兼具较大的视场张角、丰富的立体层次的同时也兼顾效益, 此时对应的各参数值称之为“合理效益取值”。

显然参数 p_x, h, e, θ 都是可以确定的量。这样就可以根据实际需求, 对 b_0, H, L 三者之间进行合理效益选取。

3 实验及讨论

在 Google Cardboard 2.0 VR 显示红外立体图像对, 验证推导结果的正确性。为避免红外相机自身规格对基线长度取值范围的限制, 实验采用单个红外相机加高精度平行导轨组合的方式获取视差图像, 红外相机参数如下: $p_x=30 \mu\text{m}, \theta=5.5^\circ$ 。红外双目系统在 $H=7 \text{m}$ 处对目标景物进行拍摄, 通过公式(4)、(18)计算满足 Panum 融合区的基线长度范围以及合理效益取值下对应的 n_0 。在这需要指出的是, 由于 VR 显示前端有一放大倍率为 2 的放大镜, 因此观察到的屏幕大小为实际屏幕尺寸的两倍。选用 3 个不同尺寸具有相同水平分辨率显示屏进行试验, 由于采用同一 VR 眼睛进行试验验证, 因此 L 保持不变 (45 mm)。实验过程中相机及显示终端主要参数如表 1 所示。

表 1 显示终端和相机主要参数

Tab.1 Main parameters of display terminal and cameras

Parameters	Screen 1	Screen 2	Screen 3
m/cm	10	10.4	12.2
k	10.4	10.8	12.7
b/mm	<14.4	<14.0	<12.0
φ/rad	2.2	2.3	2.7
n_0	327	341	401

根据所得基线长度范围, 选取 $b_0=5 \text{mm}$ 进行视差图获取, 如图 7 所示。实验所得视差图的水平像素数为 $n=690$, 根据合理效益取值下的 n_0 值, 将采集的视差图像的分辨率按不同程度进行缩减, 再将处理后的视差图像分别转到 3 组不同规格的显示

器上。

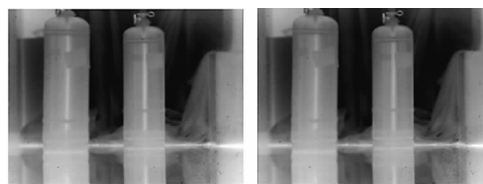


图 7 红外视差图

Fig.7 Infrared parallax image

选 20 名无视力障碍的观察者观看具有不同水平像素数的视差图像, 统计观察者感受具有最舒适立体感对应视差图的人数, 统计结果如图 8 所示。

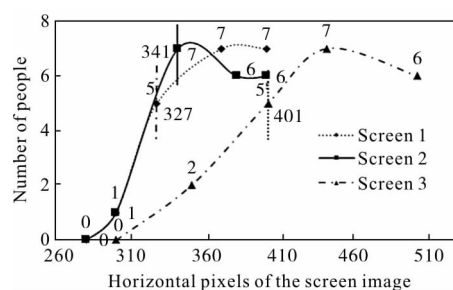


图 8 实验统计结果

Fig.8 Experimental results

从图中可以看出, 当荧幕影像的水平像素数低于合理效益下的 n_0 时, 此时随着水平像素数的增加, 观察者所获得的立体感受越舒适; 当水平像素数高于 n_0 时, 此时观察者基本感受不到差别, 人数也逐渐趋于平稳, 从而验证了推导结果的正确性。

在实验过程中也存在个别实验结果不符合整体规律的现象, 从图中也可以看出, 水平像素数超过 n_0 后也能感受到细微的差别, 存在一定的误差。误差的存在主要由以下 3 方面引起: (1) 实验过程中由于操作不当带来的误差。(2) 人的因素, 人的两眼间距, 瞳孔直径, 体视锐度因人略有不同; 不同人的立体感不同。(3) 不同规格的显示器的成像效果略有差别, 给实验测试带来误差。

4 结论

当前, 伴随着红外夜视和立体显示技术的发展, 平面显示的夜间辅助驾驶系统的弊端日益凸显。然而, 由于制造工艺的局限, 使得红外双目夜视系统的立体感知精度在一定范围内满足不了人眼立体分辨水平。

因此文中从红外双目系统以及人眼立体分辨距离出发,结合影像分层性分析合理效益下各参数的定量关系进行推导,最后设计实验方案,通过3组具有相同水平分辨率的不同规格显示屏对推导结果的正确性进行了验证。通过该方法,可以根据实际需求搭建红外双目夜视系统,既可以获得丰富的立体层次感,又可以效益最大化,从而推动红外夜视技术的发展。

参考文献:

- [1] Cai Yi. Importance of uncooled thermal imaging technology in night vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 214–217. (in Chinese)
蔡毅. 非制冷热成像在夜视技术中的作用和地位[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 214–217.
- [2] Han Bo, Li Yibin. Development of drive assistant in military [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(3): 238–240. (in Chinese)
韩波, 李宜斌. 军用车辆辅助驾驶仪的发展 [J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 238–240.
- [3] Sun Yanlu. Depth detail expression and related factors of binocular parallax stereo movies from spatial visual image hierarchy[J]. *Motion Picture & Video Technology*, 2014, 2: 15–18. (in Chinese)
孙延禄. 从空间视在影像分层性看双眼视差式立体电影的深度细节表现力及其相关因素 [J]. 影视技术, 2014, 2: 15–18.
- [4] Yamanoue H. The differences between toed-in camera configurations and parallel camera configurations in shooting stereoscopic images[C]//ICME, 2006: 1701–1704.
- [5] Gao Qiang, Jin Jie, Shen Lili, et al. Effect analysis of horizontal parallax on 3D images comfortableness using EEG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4140–4145. (in Chinese)
高强, 金杰, 沈丽丽, 等. 使用 EEG 分析水平视差对 3D 图像舒适性的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4140–4145.
- [6] Deng Huan, Wang Qionghua. Parallax images acquired by parallel camera array with shift [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2985–2988. (in Chinese)
邓欢, 王琼华. 平行摄像机阵列移位法获取视差图像的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2985–2988.
- [7] Wang Aihong, Wang Qionghua. Relationship between stereo depth and parallax image captured in stereoscopic display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (2): 433–438. (in Chinese)
王爱红, 王琼华. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 433–438.
- [8] Agarwal A, Lake A. Dense stereo matching over the panum band [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(3): 416–430.
- [9] Wu Xi, Liu Yuhua, Yan Shaoming. Panum's fusional area of normal human's binocular vision [J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 1999, 19(5): 375–376. (in Chinese)
吴夕, 刘玉华, 颜少明. 正常人双眼视觉的 Panum 融合区 [J]. 眼科新进展, 1999, 19(5): 375–376.
- [10] Hu Hanping. Research on key technology of binocular stereovision ranging [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
胡汉平. 双目立体测距关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [11] Parker A J. Binocular depth perception and the cerebral cortex[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2007, 8(5): 379–391.
- [12] Li Lin. Applied Optics[M]. 4th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 60–61. (in Chinese)
李林. 应用光学[M]. 第4版. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 60–61.