

立体视觉舒适融合限预测模型的研究

林丽媛,侯春萍,王 凯

(天津大学 电子信息工程学院,天津 300072)

摘要: 针对导致立体显示中视觉舒适度问题的关键——立体视觉舒适融像问题,利用随机点立体图像(Random dot stereograms, RDS),对影响立体视觉舒适融像的因素进行了研究。通过改变 RDS 隐藏图形的大小,随机点的密度,随机点的大小和隐藏图形的形状,利用主观行为实验,分析这些因素对于立体视觉舒适融合限(Comfortable fusion limits, CFL)的影响,并提出关于 CFL 与这些因素的预测模型。实验结果表明,这些因素在交叉视差和非交叉视差情况下,对于立体视觉 CFL 的影响不同:非交叉视差下,被试者能够承受更大的隐藏图形,并且对于隐藏图形形状的 CFL 的感知与交叉视差相反;对由预测模型计算得出的 CFL 的预测值和实测值进行相关性检测,在交叉视差下,相关系数为 0.998,非交叉视差下相关系数为 0.977,可以认为该预测模型能够较为准确地预测 CFL。

关键词: 立体视觉; 视觉舒适度; 舒适融合限; 随机点立体图

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0231-07

Research on the prediction model of vision comfortable fusion limits

Lin Liyuan, Hou Chunping, Wang Kai

(College of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Random dot stereograms were used to study the factors of the key problem that existed in the visual comfort of stereo display and was caused by stereo vision comfortable fusion. Subjective behavior experiments were done to analysis the factors to affect CFL(Comfortable fusion limits) of stereo vision by changing the size and shape of a hidden graph, the dots density and dot size in random dot stereograms. Then a prediction model of these factors to CFL was put forward. The results showed that these factors had different influences on CFL under crossed disparity and uncrossed disparity. Under uncrossed disparity, the subjects can stand bigger size of hidden graph, and the perception of fusion limit for the shape is opposite to the perception under crossed disparity. Correlation detection was measured between the prediction values calculated by the prediction model and the measured values. The correlation coefficient achieved 0.998 and 0.977, respectively, under crossed disparity and uncrossed disparity, which

收稿日期:2014-10-16; 修订日期:2014-11-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)重大项目(2012AA03A301);国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91320201);
国家自然科学基金(61471262);教育部博士点基金(20110032110029, 20130032110010)

作者简介:林丽媛(1985-),女,博士生,主要从事运动立体视觉舒适度方面的研究。Email:linly@tju.edu.cn

导师简介:侯春萍(1957-),女,教授,博士生导师,主要从事图像处理和移动通信方面的研究。

indicated that the prediction model could more accurately predict the CFL.

Key words: stereo vision; visual comfort; comfortable fusion limits; random dot stereograms

0 引言

随着大量高分辨率立体电视投入市场,三维立体显示技术已经成为未来显示技术的重要发展方向^[1]。然而,立体显示系统还存在许多问题,使人们在观看立体图片或者视频时,容易引发视疲劳^[2]。立体视觉舒适融像问题,是导致立体显示舒适度问题产生的关键,为了完善立体显示系统,获得更舒适的观看效果,研究人员对立体视觉舒适融像原理进行了大量的研究。

1962年,Julesz发明了RDS,排除了单眼深度线索和心理暗示的影响,证明了双眼视差才是产生立体视觉的基础^[3]。立体视觉本质上是眼、脑配合的融像结果,RDS为研究眼、脑的融像功能打下了基础,许多研究人员利用RDS在立体视觉舒适融像领域得到了很多成果^[4-5]。其中,D.Qin等人利用RDS研究了在中央凹附近的双眼视差融合限的范围,搭建了测量Panmu融合区的测试装置并研究了Panmu融合区的测量方法^[6-7]。D.Kim等人利用RDS研究由传统立体显示引起的趋异调节冲突,得出交叉视差和非交叉视差对融合时间有重要影响^[8]。在国内,吴夕、颜少明等人利用RDS研究了正常人双眼视觉的Panum融合区^[9]。

然而,以上研究都没有考虑CFL对人类立体视觉舒适融像的影响。文中将CFL作为立体视觉舒适融像的评判标准,CFL越大,表示舒适融像范围越大。通过研究影响CFL的因素,进一步探究这些因素对于人类立体视觉舒适融像的作用和影响。

1 立体视觉舒适融像

大脑利用双眼视差提取立体视觉中的深度信息,从而形成深度感知。感知到的物体,可能出现在立体显示屏幕上,或者是显示屏幕的前面或后面,因此形成的双眼视差也被分别称为零视差(Zero Disparity)、交叉视差(Crossed Disparity)和非交叉视差(Crossed Disparity),分别对应图1上的A点、B点和

C点处的视差。

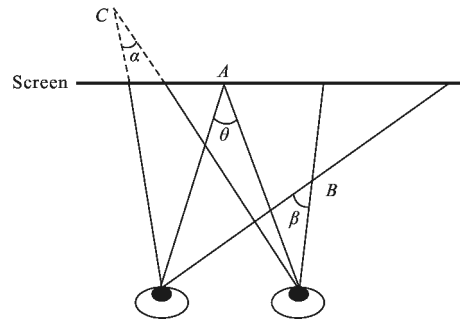


图1 双眼视差几何光路图

Fig.1 Geometric optical path diagram binocular parallax

图2所示为Panum融像空间^[10],在Panum空间远界和近界范围内的点能够产生双眼单视,超出这个范围则会产生双眼复视。在文中,被试者观看过程中能够舒适地产生立体视觉称为舒适融像,为在双眼单视前提下能够舒适融像的视差范围,用屈光度D表示。

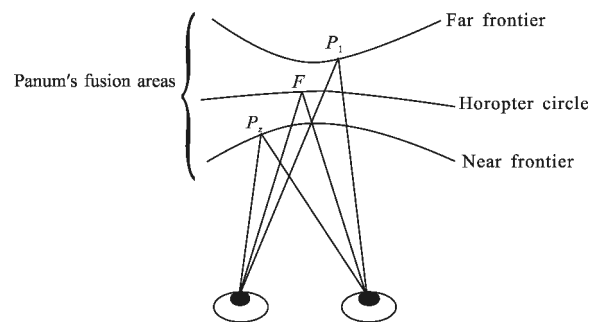


图2 Panum 融像空间

Fig.2 Panum fusion areas

2 实验设计

32名被试者参与此次试验,其中22名男生,10名女生,年龄范围为21~25岁,被试者经检测均立体视正常或矫正正常。实验前,被试者经过15s的预实验适应并了解实验过程。参考赵丽等人单帧图像序列的制作方法^[11],以及赵霆从单幅图像恢复立体景象的方法^[12],该实验采用随机点立体图像作为测试图像,由Matlab生成,可以排除其他心理暗示线索

的影响。

实验采用 3D windows 显示器,如图 3 所示,是双液晶屏的双路显示终端。由两块高分辨率(1 280×1 024)液晶屏和一个 45°倾斜的半透膜组成。左、右眼的图像分别显示在上、下两块液晶屏幕上。观看者通过佩戴偏振眼镜,左图投射进左眼,右图投射到右眼,形成深度感知,从而就能够欣赏到栩栩如生的 3D 图像,并能有效消除串扰的影响。



图 3 3D windows 显示器和偏振眼镜
Fig.3 3D display and polarized glasses

一共进行 4 组实验。每位被试者每组测试时间不得超过半小时,观看每幅图不超过 30 s,图片切换时约有 5 s 休息时间。保持其他条件不变,改变图片视差,由被试者判断能否清晰地感知深度,记录被试者能够感知的最后一个视差值。视差的增大或者减小需要阶跃进行,不能连续变化。四组实验中的参数设定详见表 1。分别测试隐藏图形大小(隐藏图像占整幅图像大小的百分比)、随机点大小、随机点密度、隐藏图形形状与舒适融合限的关系。

表 1 实验参数设定

Tab.1 Experimental parameters setting

Group	Hidden graph size /%	Random dot size /pixel	Random dot density	Hidden graph shape
1	10,30,50	1,10,22	0.5	Rectangle
2	30	1,10	0.1,0.3,0.7,0.9	Rectangle
3	10,30	1,7,13,19,25	0.5	Rectangle
4	30	1,16,28	0.5	Rectangle, Roundness, Triangle

3 实验结果

3.1 实验数据处理

利用所得数据对 CFL 与隐藏图形形状、隐藏图

形大小、随机点大小、对非交叉视差下计算后的实验数据进行整理。由于在进行实验时,被试者的情绪、知识背景、健康状况、疲劳程度以及其他的一些因素均会导致测试结果受到影响。为了排除这些影响,得到更准确的实验结果,实验中利用 Grubbs 检验来剔除不正常数据。检验标准 α 为 0.05,Grubbs 公式如下所示:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$G_n' = \frac{\bar{x} - x_1}{S} \quad (2)$$

$$G_n = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (3)$$

首先将每组实验数据从小到大进行排序, x_1 为最小值, x_i 是排序后的第 i 个数据, \bar{x} 是此组所有统计数据平均值。 n 为一组数据的个数, S 为样品标准差。首先,计算平均值 \bar{x} ,并通过公式(1)得到样品标准差 S 的值,然后利用公式(2)、(3)计算 G_n 和 G_n' 。已设定检验标准 α 为 0.05,由 Grubbs 检验值表得到 $G_{1-\alpha_n}$ 。如果 $G_n > G_{1-\alpha_n}$,则相应的 x_i 是一个异常值,将它从数据中剔除。如果 $G_n' > G_{1-\alpha_n}$,表示 x_1 是一个异常值,将其剔除。检验结束后,得到一组新的数据,计算均值,所得到的即为 CFL 的大小。

3.2 实验结果及分析

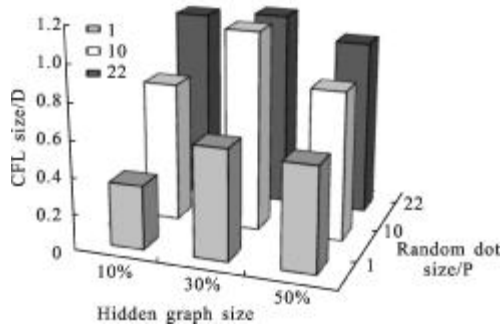
对比图 4(a)和(b)可以发现,对于交叉视差,当隐藏图形是大小为 30%的三角形,随机点的密度为 0.7 时,CFL 最大,舒适融像的范围也最大;在非交叉视差时,被试者能够承受面积更大的隐藏图形。可以推断,存在心理学等原因,使得被试者感觉相同大小的图形在非交叉视差更小一些。

对比图 5(a)和(b),能够看到,随机点较小的时候,融合限随着密度增大而增大;随机点较大时,曲线为抛物线形,融合限先随着密度的增大而增大,密度达到 0.7 时,融合限又随着密度的增大而减小。因此,存在一个使融合限最大的密度值。

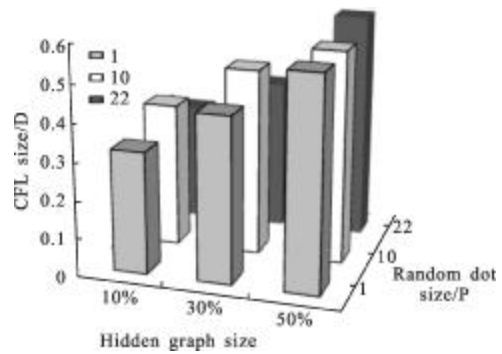
对比图 6(a)和(b)可以看出,CFL 随着随机点的增大而变大,随机点的大小与 CFL 的关系曲线符合对数曲线,从柱状图上可以看出,随机点的大小是影响 CFL 的最大因素。

对比图 7(a)和(b)发现,隐藏图形为圆形时,CFL 最小,隐藏图形为三角形时,CFL 最大;交叉视差时情况相反。

由图 4~图 7 中柱状图可知,在交叉视差时,CFL 的范围在 0.3D~1.5D 之间;在非交叉视差时,CFL 的范围在 0.3D~0.7D 之间。由此可知,交叉视差时的 CFL 范围比非交叉视差时的 CFL 范围大,并且交叉视差的 CFL 值也高于非交叉视差的 CFL 值。



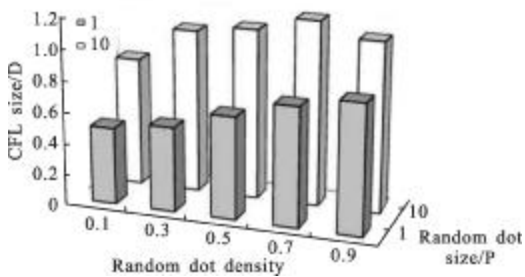
(a) 交叉视差
(a) Crossed disparity



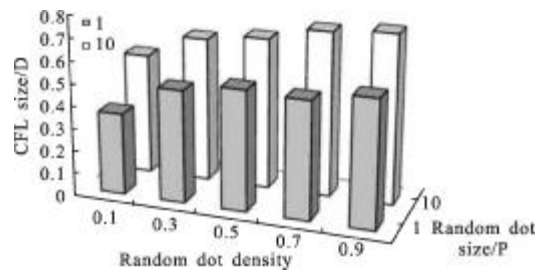
(b) 非交叉视差
(b) Uncrossed disparity

图 4 隐藏图形大小与舒适融合限关系

Fig.4 Relationship between the size of hidden graphs and comfortable fusion limit



(a) 交叉视差
(a) Crossed disparity

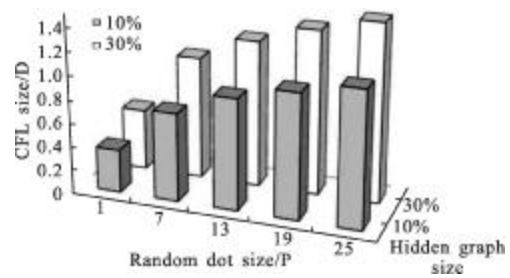


(b) 非交叉视差

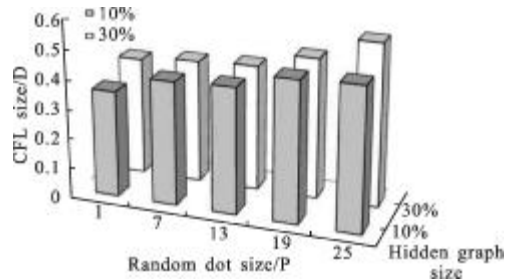
(b) Uncrossed disparity

图 5 随机点密度与舒适融合限关系

Fig.5 Relationship between dots density and comfortable fusion limit



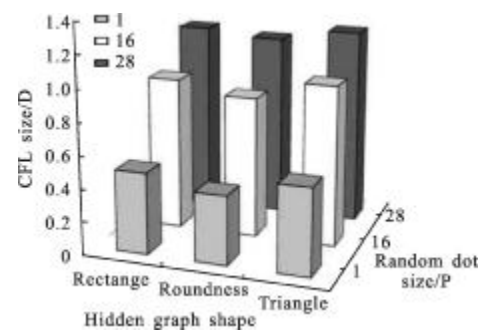
(a) 交叉视差
(a) Crossed disparity



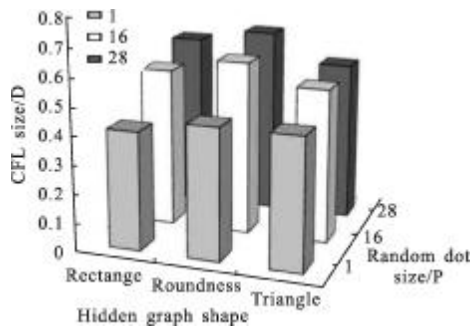
(b) 非交叉视差
(b) Uncrossed disparity

图 6 随机点大小与舒适融合限关系

Fig.6 Relationship between the size of random dot and comfortable fusion limit



(a) 交叉视差
(a) Crossed disparity



(b) 非交叉视差

(b) Uncrossed disparity

图7 隐藏图形形状与舒适融合限关系

Fig.7 Relationship between the hidden graph shape and comfortable fusion limit

4 模型建立

根据以上实验结果,提出一个计算 CFL 的拟合公式,由交叉视差下的舒适融合限 $CFL_{crossed}$ 和非交叉视差下的舒适融合限 $CFL_{uncrossed}$ 两部分组成。去除非数值变量的隐藏图形形状因素。假设隐藏图形大小为 a ,随机点密度为 b ,随机点大小为 c , CFL 为舒适融合限。对测得的交叉视差数据,利用普通最小平方方法(Ordinary least square, OLS)进行回归分析,得到数据如表 2 所示,其中, P-value 为各个回归参数对应

表 2 交叉视差下 OLS 回归分析

Tab.2 Regression analysis under crossed disparity

Independent variable	Coefficient	Standard error	P-value
a	3.853	0.616	0.000
c	0.059	0.008	0.000
a ²	-6.323	1.087	0.000
b ²	1.413	0.577	0.023
c ²	-0.001	0.000	0.001
b ³	-1.160	0.607	0.069
ac	-0.032	0.017	0.079
Constant term	-0.188	0.118	0.125
R-square	0.926	Prob>F	0.000

的假设检验概率,表示显著程度;R-square 为测定系数(拟合优度),表示用随机点大小、随机点密度、隐藏图形大小可解释 CFL 变化的程度,R-square 越大,说明该回归方程回归效果越显著;Prob>F 的为显著性统计量的 P 值,Prob>F 的值为 0,远远小于显著性

$$CFL = \begin{cases} -0.226+3.713a-5.380a^2+1.164b^2-0.838b^3+0.072c-0.001c^2-0.037ac, & \text{Crossed disparity} \\ 0.266+0.466a+0.273b^3+0.004c, & \text{Uncrossed disparity} \end{cases} \quad (6)$$

水平 0.05,说明该回归方程有效,方程中至少有一个回归系数显著不为零。发现变量 a 、 c 、 a^2 、 c^2 在 1% 的统计水平上显著, b^2 在 5% 的统计水平上显著, ac 、 b^3 在 10% 的统计水平上显著。

对实验数据进行布鲁奇 (Breusch-Pagan, BP) 异方差检验。检验证明存在异方差,故利用加权最小平方方法 (Weighted least square, WLS) 进行异方差修正,得到表 3。

表 3 交叉视差下异方差修正

Tab.3 Heteroscedasticity correction under crossed disparity

Independent variable	Coefficient	Standard error	P-value
a	3.713	0.227	0.000
c	0.072	0.003	0.000
a ²	-5.380	0.385	0.000
b ²	1.164	0.188	0.000
c ²	-0.001	0.000	0.000
b ³	-0.838	0.202	0.000
ac	-0.037	0.006	0.000
Constant term	-0.226	0.044	0.000

剔除异方差后,所有变量均在 1% 的统计水平上显著,则交叉视差下 $CFL_{crossed}$ 的拟合公式为:

$$CFL_{crossed} = -0.226 + 3.713a - 5.380a^2 + 1.164b^2 - 0.838b^3 + 0.072c - 0.001c^2 - 0.037ac \quad (4)$$

对测得的非交叉视差数据,进行 OLS 回归分析,得到相关变量见表 4。

表 4 非交叉视差下 OLS 回归分析

Tab.4 Heteroscedasticity correction under crossed disparity

Independent variable	Coefficient	Standard error	P-value
a	0.466	0.120	0.001
c	0.004	0.002	0.031
b ³	0.273	0.084	0.003
Constant term	0.266	0.043	0.000
R-square	0.539	Prob>F	0.000

经检验,数据不存在异方差,所以得到非交叉视差下 $CFL_{uncrossed}$ 的拟合公式为:

$$CFL_{uncrossed} = 0.266 + 0.466a + 0.273b^3 + 0.004c \quad (5)$$

由公式(4)和(5)得到 CFL 统一的公式如下:

利用此公式对交叉视差和非交叉视差 CFL 进行预测,并与实测值进行比较。按照实验设计要求,重新进行一组实验,记录测试得到的 CFL。在交叉视差和非交叉视差下预测值和实测值对比结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 交叉视差下 CFL 预测值与实测值对比

Tab.5 Predicted scores of CFL, and measured scores of CFL under crossed disparity

Hidden graph size	Random dot density	Random dot size /pixel	Predicted score/D	Measured score/D
10%	0.1	4	0.359 5	0.4
10%	0.3	4	0.430 8	0.45
10%	0.9	1	0.490 7	0.5

表 6 非交叉视差下 CFL 预测值与实测值对比

Tab.6 Predicted scores of CFL, and measured scores of CFL under uncrossed disparity

Hidden graph size	Random dot density	Random dot size /pixel	Predicted score/D	Measured score/D
30%	0.5	1	0.443 9	0.4
30%	0.5	16	0.503 9	0.55
30%	0.5	28	0.551 9	0.6

计算 CFL 预测值与实测值之间的相关系数,在交叉视差下,相关系数为 0.998;非交叉视差下相关系数为 0.977。充分表明该拟合公式能够较为准确的预测立体视觉的 CFL。

图 8 是 CFL 的预测值与经主观评价得到的实测值的散点图,从图上可以看出,交叉视差和非交叉

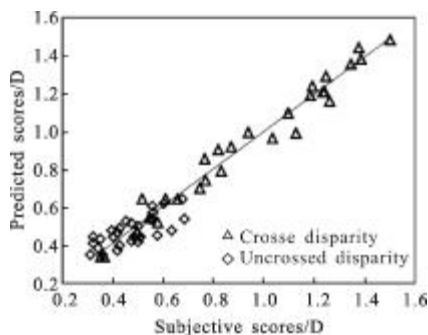


图 8 预测值与主观评价值的散点图

Fig.8 Scatter plot of predicted scores and subjective scores

视差两种情况下的主观评价与预测值集中分布在对角线附近区域,说明预测值与主观评价具有高

度的一致性。其中交叉视差分布在散点图中,非交叉视差集中到散点图左下角部分,说明交叉视差的 CFL 的范围比非交叉视差情况下的 CFL 要大。

5 结论

文中利用 RDS 探索影响立体视觉 CFL 的因素,通过改变隐藏图形大小,随机点密度,随机点大小以及隐藏图形形状,对不同因素的影响效果进行测试,并提出影响 CFL 因素的预测公式。实验结果表明,在交叉视差时,CFL 的范围和值更大。尤其是对于隐藏图形大小和隐藏图形形状变化的影响,非交叉视差下,被试者能够承受更大的隐藏图形,并且,对于图形形状的 CFL 感知,与交叉视差相反。对由预测模型计算得出的 CFL 的预测值和实测值进行相关性检测,在交叉视差下,相关系数为 0.998,非交叉视差下相关系数为 0.977,可以认为该预测模型能够较为准确地预测 CFL。文中的实验结果,对于舒适立体显示节目的制作具有一定的指导与实践意义,对应用 RDS 进行检测的一些对立体视觉需求较为严密的特殊职业诸如驾驶员、飞行员等行业中,可以提供一定的心理学测试依据和参考。

参考文献:

- [1] Yang Jiachen, Hou Chunping, Lei Jianjun. Objective quality evaluation method of stereo image based on human visual characteristics [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2009, 42(7): 622-627. (in Chinese)
杨嘉琛,侯春萍,雷建军.基于人眼视觉特征的立体图像质量客观评价方法[J].天津大学学报(自然科学版),2009,42(7): 622-627.
- [2] Lambooi M, Fortuin M, Heynderickx I. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(3): 30201-1.
- [3] Julesz B. Visual pattern discrimination [J]. Information Theory, IRE Transactions on, 1962, 8(2): 84-92.
- [4] Erkelens C J. Fusional limits for a large random-dot stereogram[J]. Vision Research, 1988, 28(2): 345-353.
- [5] Harris J M, Parker A J. Efficiency of stereopsis in random-dot stereograms[J]. JOSA A, 1992, 9(1): 14-24.
- [6] Qin D, Takamatsu M, Nakashima Y. Measurement for the Panum's fusional area in retinal fovea using a three-dimension display device [J]. Journal of Light & Visual

- Environment, 2004, 28: 126.
- [7] Qin D, Takamatsu M, Nakashimay. Disparity limit for binocular fusion in fovea[J]. Optical Review, 2006, 13(1): 34-38.
- [8] Kim D, Choi S, Sohn K. Effect of vergence-accommodation conflict and parallax difference on binocular fusion for random dot stereogram [J]. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, 2012, 22(5): 811-816.
- [9] Wu Xi, Liu Yuhua, Yan Shaoming. Normal binocular vision of Panum fusion [J]. Rec Adv Ophthalmol, 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] Panum P L, Petersen J J. Observations Made During the Epidemic of Measles on the Faroe Islands in the Year 1816 [M]. USA: FH Newton, 1940.
- [11] Zhao Li, Zhao Yuming, Wan Changming. Composition method of color stereo image based on single frame image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 382-385. (in Chinese)
赵丽, 赵宇明, 万长明. 基于单帧图像的彩色立体图像的生成[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 382-385.
- [12] Zhao Ting, Tan Zheng. Novel approach of recovering stereo view scene from a single image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 33(6): 629-633. (in Chinese)
赵霆, 谈正. 从单幅图像恢复立体景象的新方法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 33(6): 629-633.