

文章编号 1674-2915(2008)01-0070-05

# 一个新的空间掩盖效应拟合公式

张煜东, 吴乐南, 韦 耿

(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要** 传统的空间掩盖效应是采用韦伯(Weber)定律来描述的,然而该定律仅考虑了明视觉区,对较弱或较强的光强均不合适。为了更好地描述空间掩盖效应,本文利用信号处理方法,给出了一种新的拟合公式。实验用不同模型拟合 Konig 与 Brodhun 的实验数据,证实了提出的模型均方根误差仅为 0.010 2,小于传统的 Weber 定律、Weber 定律的优选表达式、Guilford 模型,以及 Chen 模型。结果表明,提出的拟合公式在更宽的光强范围内都能与数据很好地拟合,可更广泛地用于工程实践。

**关键词** 韦伯定律;差别域;数学模型;空间掩盖效应

中图分类号:TP391;O432.2 文献标识码:A

## A novel fitting formula for spatial concealment effect

ZHANG Yu-dong, WU Le-nan, WEI Geng

(School of Information Science &amp; Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** : Traditional spatial concealment effect is described by Weber law. However, it only considers photopic vision, and can not fit to weaker or stronger light intensity. In order to depict spatial concealment effect more effectively, a novel fitting formula was proposed only by signal processing method. Several different models is used to fit the data in Konig and Brodhun in experiments, and the fitted results demonstrate that the root mean square error of the proposed model is only 0.010 2, which is less than those of traditional Weber law, superior form of Weber law, Guilford model, and Chen model. It can be concluded that proposed model can fit to human eyes in more expansive range of light intensity, and can be applied to engineering practice more widely.

**Key words** : Weber law; difference limen; mathematical model; spatial concealment effect

## 1 引言

掩盖效应,但其仅考虑了明视觉区,对弱刺激与强刺激均不适合。因此,学者们对其提出若干种修订的尝试。

传统的韦伯(Weber)定律主要用于描述空间

Fullerton 与 Cattell 提出差别域与刺激强度的

收稿日期 2008-09-11;修订日期 2008-10-13.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目( No. 2008AA01Z227 );国家自然科学基金资助项目( No. 60572063 ; No. 60872075 );高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目( No. 706028 );江苏省自然科学基金资助项目( No. BK2007103 ).

平方根成反比;Woodworth 在此基础上进一步假设,当刺激强度增加时,其差别域的合成遵守测量误差的迭加规律,从而认为差别域的实验数据都落到 Cattell 定律与 Weber 定律之间;Guilford<sup>[1]</sup>建议通过实验数据尝试一个“普适的心理物理学定律”,即差别域与刺激强度的  $n$  次幂成正比,该定律在弱刺激下比 Cattell 定律更好地符合实验结果,但在广大得多的中强刺激下,与实际脱节;Stevens<sup>[2]</sup>引用 Weber 定律修订方案来论证最小觉差(j. n. d.)的主观感受并非恒定时,可选择“Weber 定律的优选表达式(Superior Form)”,该修订方案认为差别域与刺激强度增加一个恒定的背景值成正比,它虽然在中强刺激下与 Weber 定律接近,并能给出弱刺激下 Weber 定律上升现象,但却上升得太急,与实验差别过大;Chen<sup>[3]</sup>提出用分段函数来描述韦伯比,实验证明 Chen 提出的分段模型效果良好,但在间视觉区与明视觉区的交界处误差较大。

本文从信号处理手段出发,给出一种描述空间掩盖效应的模型,实验证明了本文模型优于传统的韦伯定律、优选表达式、Guilford 模型和 Chen 模型。

## 2 空间掩盖效应

如图 1 所示,一个固定的背景亮度  $I_B$  被包含在视角为  $1.5^\circ$  的圆内,背景外的区域叫环境,亮度为  $I_s$ 。虚线包围区域的亮度即为激励  $\Delta I$ ,当它的亮度变化到使人感觉刚可见时,对应的  $\Delta I$  即为可见度阈值。实验表明,可见度阈值主要和背景亮度有关,这就是空间掩盖效应<sup>[1]</sup>。

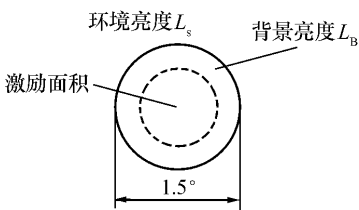


图 1 证实 Weber 定律的实验

Fig. 1 Weber law demonstrated by experiment

描述空间掩盖效应最著名的定律就是 Weber

定律<sup>[2]</sup>,它指出当  $I_B = I_s$  时,  $\Delta I$  几乎随  $I_B$  线性增加。

事实上,可以将光强分为 3 个视觉区间<sup>[5]</sup>:间视觉区、明视觉区与超强的炫视觉区。当光强  $I < 0.1178 \text{ cd/m}^2$  ( $0.037 \text{ mL}$ ) 时,人眼视觉主要由视觉分析器完成;而当  $I$  在  $3.183 \text{ cd/m}^2$  ( $1 \text{ mL}$ ) ~  $3183 \text{ cd/m}^2$  ( $1000 \text{ mL}$ ) 时,人眼视觉主要由瞳孔变化完成,这部分就是 Weber 定律所描述的内容;当  $I$  继续增加时,因为瞳孔缩小到极限,于是眼睛的感受性急剧下降,造成  $\Delta I/I$  随  $I$  增大而增加的反常现象,由于这样会对眼睛造成伤害,所以这部分研究很少。

因此,韦伯定律仅仅考虑了明视觉区,不适合描述空间掩盖效应。尽管学者们提出的各种不同改进模型,但是仍然存在以下两点不足:(1)不能与实验数据很好拟合;(2)在间视觉区与明视觉区的交界处误差较大。

## 3 新模型的建立

传统方法从神经生理学的理论出发,建立数学模型,然后通过理论推导,得出空间掩盖效应的拟合函数。

本文从信号处理的手段出发,首先列出所有工程处理常用模型<sup>[5]</sup>见表 1。其中  $x, Y$  是预先给定的数据,  $a, b, c, p, q$  为参数,  $N$  与参数数目成正比,通过对这些参数进行调整,可以减小拟合曲线与试验数据的误差。

对表 1 中所有模型,用专业的拟合工具 Matlab 工具箱的 Curve Fitting Toolbox 进行拟合。准则如下:在足够逼近实验数据的基础上,强迫参数尽可能少。最终本文选取 exp2 模型,其精度足够高,且参数仅有 4 个,模型如下:

$$\Delta I/I = 0.0107I^{-1.011} + 0.0833I^{-0.2755}, \quad (1)$$

## 4 实验

数据采用 Konig 与 Brodhun 的视觉明度觉差实验数据<sup>[3]</sup>,由于历史原因,原数据均以毫朗伯为单位,按照  $1 \text{ mL} = 10/\pi \text{ cd/m}^2$  的转换公式,将数据列于表 2。

表 1 经典拟合模型

Tab. 1 Classical model for fitting

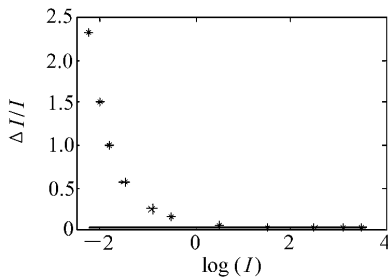
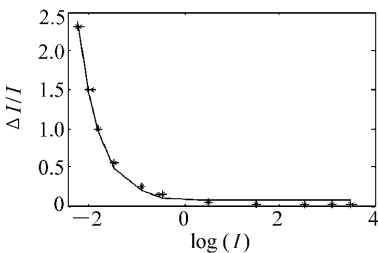
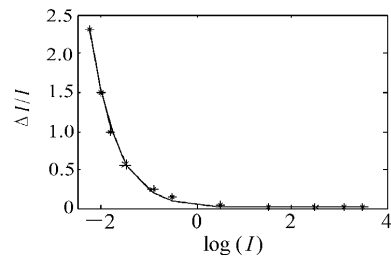
拟合模型	公式	参数数目
Weibull	$Y = a \cdot b \cdot x^{(b-1)} \cdot \exp(-a \cdot x^b)$	2
expN	$Y = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot x) + \dots + a_N \cdot \exp(b_N \cdot x)$	2N
FourierN	$Y = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot p) + b_1 \cdot \sin(x \cdot p) + \dots + a_N \cdot \cos(N \cdot x \cdot p) + b_N \cdot \sin(N \cdot x \cdot p)$ 其中 $p = 2 \cdot \pi / (\max(x\Delta) - \min(x\Delta))$	2N + 1
GaussN	$Y = a_1 \cdot \exp(-((x - b_1)/c_1)^2) + \dots + a_N \cdot \exp(-((x - b_N)/c_N)^2)$	3N
polyN	$Y = p_0 \cdot x(N) + p_1 \cdot x(N-1) + \dots + p_N$	N + 1
powerN	$Y = a_1 \cdot x^{b_1} + \dots + a_N \cdot x^{b_N} + c$	2N + 1
ratMN	$Y = (p_1 \cdot x^M + \dots + p_{M+1}) / (x^N + \dots + q_N)$	M + N + 1
sinN	$Y = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + \dots + a_N \cdot \sin(b_N \cdot x + c_N)$	3N

表 2 空间掩盖效应实验数据

Tab. 2 Experimental data of special concealment effect

$k$ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$\log I$	$\Delta I/I$
0.005 7	-2.244	2.33
0.009 5	-2.022	1.5
0.015	-1.825	1
0.031 8	-1.497	0.57
0.117 8	-0.929	0.25
0.318 3	-0.497	0.15
3.183 1	0.503	0.053
31.831	1.503	0.025 6
318.31	2.503	0.020 4
1 273.2	3.105	0.020 4
3 183.1	3.503	0.020 4

本文得到的模型与经典的 4 个模型对视觉明度差实验数据的拟合程度示于图 2。由于数据覆盖了近 9 个数量级的光强范围,所以横轴采用以 10 为底的对数坐标。可以看出,Weber 定律仅仅是因为形式简单而流行甚广,它与实验结果相差甚大,对弱刺激的失真尤其大。

(a) Weber 模型  
(a) Weber model(b) Weber 优化模型  
(b) Superior form of Weber

(c) Guilford 模型

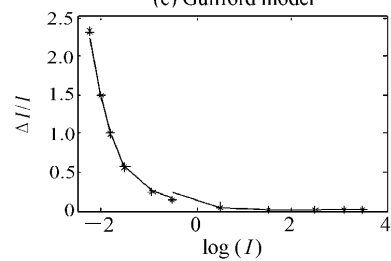
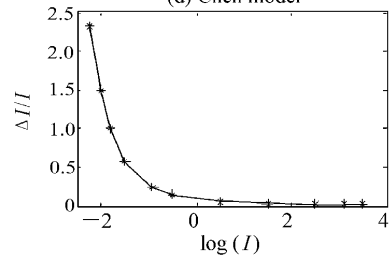
(d) Chen 模型  
(d) Chen model(e) 本文模型  
(e) Proposed model图 2 不同模型的韦伯比比较 ( $I$  单位为  $\text{cd}/\text{m}^2$ )

Fig. 2 Comparison of Weber law vs different models

图 2 表明本文模型很好地解决了间视觉区与明视觉区的过渡区问题,而其余 4 种模型在此区域均无法很好地模拟实际情况。

表 3 列出了不同模型的仿真结果,评价参数选取均方根误差(RMSE)趋于 0 代表效果好。

RMSE 证实了本文模型的有效性,同时可以看出本文模型常数仅有 4 个,比 Chen 模型少 2 个,但是 RMSE 却只有 Chen 模型的 1/3 左右。需要注意的是,传统的模型以 mL 为单位,这里将其转化为  $\text{cd}/\text{m}^2$  为单位后,个别公式的参数会有变化。

表 3 空间掩盖效应的不同模型拟合误差比较

Tab.3 Comparison of RMSE of different models depicting spatial concealment effect

模型	表达式( $\text{cd}/\text{m}^2$ )	RMSE
Weber	$\Delta I/I = 0.0204$	0.8973
Superior form	$\Delta(I + 0.1913) = 0.0695$	0.0517
Guilford	$\Delta I/I^{0.1808} = 0.0336$	0.0358
Chen	$(\Delta I/I)_{\text{dark}} = 0.11 + 0.0216I^{-0.89}$ $(\Delta I/I)_{\text{light}} = 0.02 + 0.0833I^{-0.80}$	0.0285
本文模型	$\Delta I/I = 0.0107I^{-1.011} + 0.0833I^{-0.2755}$	0.0102

## 5 应用

图 3 给出了 Weber 模型与本文模型用于图像增强时为保证人眼能够辨别相邻灰度值,每一阶灰度值对应的亮度  $I_n$  与灰度值  $n$  的关系。与计算机中用 8 bit 表征亮度相对应,采用 0 ~ 255 来表征亮度  $I_n$ 。图 3(a)与图 3(b)为互逆关系。原理如下:

将  $I$  替换成  $I_n$ ,  $\Delta I$  替换成  $I_{n+1} - I_n$ ,对表 3 中的模型进行置换,可发现 Weber 模型置换后即为

$$I_n = (1 + 0.0204)^n I_0, \quad (2)$$

这是一个指数模型,其逆函数为一对数模型,即为众所周知的对数增强法,参见图 3 的曲线部分。而本文模型置换后得

$$I_{n+1} = I_n (1 + 0.0107I_n^{-1.011} + 0.0833I_n^{-0.2755}), \quad (3)$$

取一常规值  $I_0 = 0.0032 \text{ cd}/\text{m}^2$  ( $0.001 \text{ mL}$ ), 逐次迭代,可得式(3)的  $I_n$  与  $n$  的数值解,参见图 3 的实线部分。

可见,基于传统 Weber 模型的增强函数是对数函数,而使用本文模型后得出的增强函数是一种类似对数函数的曲线,在暗区更加陡峭,即动态范围进一步增大,而在亮区比对数曲线稍微平缓,由上述空间掩盖效应可知,这种改变更加适合于人眼的感受。

图 4 是标准测试图像 Cameraman 采用 Weber 模型与本文模型的结果。可见,采用 Weber 模型增强之后虽然比原图有所改善,但是改善不大。而采用本文模型增强之后,在灰度值较小的区域(如领子、袖口处)更加清晰,纽扣与衣褶等细节也变得清晰可辨,而在灰度值较大的区域仍然保持较好的增强效果。

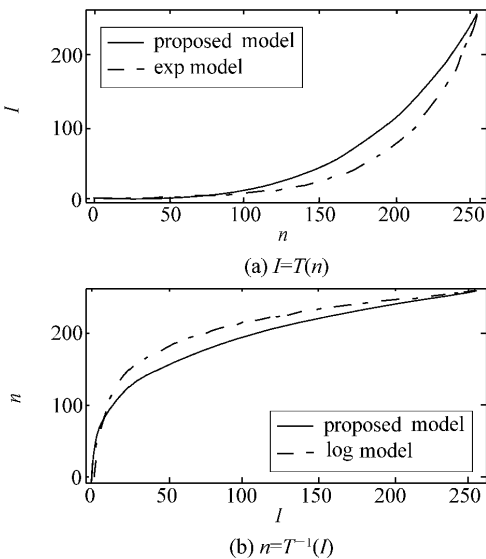


图 3 Weber 模型与本文模型用于图像增强

Fig.3 Image enhancement by Weber model and Proposed model



图 4 Cameraman 增强对比

Fig. 4 Comparison of Cameraman enhancement

## 6 结 论

本文给出的视觉掩盖模型在工程上很有应用前景。例如,传统基于 Weber 定律的图像增强或图像编码,对于低灰度值区域往往无法有效处理<sup>[6]</sup>,其中主要原因就是因为 Weber 定律对间视

觉区的失真过大。若采用本文模型来模拟空间掩盖效应,可以期望对暗区域的增强更加清晰,或者对暗区域的编码更加有效,这是用传统 Weber 定律所无法达到的。

本文进一步的工作是结合人眼神经元细胞理论论证本文提出的拟合公式。

## 参考文献:

- [ 1 ] GUILFORD J P. A generalized psychological law[ J ]. *Psychological Rev.* ,1932 39( 1 ) :73-85.
- [ 2 ] STEVENS S S. On the psychophysical law[ J ]. *Psychological Rev.* ,1957 64( 3 ) :153-181.
- [ 3 ] 陈文熙. 韦伯比的拟合公式[ J ]. *心理学报* ,1996 28( 4 ) :419-424.  
CHEN W X. An analytical expression of Weber ratio[ J ]. *Acta Psychologica Sinica* ,1996 28( 4 ) :419-424. ( in Chinese )
- [ 4 ] ROVAMO J ,MUSTONEN J ,NASANEN R. Neural modulation transfer function of the human visual system at various eccentricities[ J ]. *Vision Res.* ,1995 35( 6 ) :767-774.
- [ 5 ] KEN D ,STEVE T ,BILL B. *MATLAB & Simulink Based Books*[ M ]. New Jersey :Addison-Wesley ,1997.
- [ 6 ] KEECHUL J ,KWANG I K ,ANIKL K J. Text information extraction in images and video a survey[ J ]. *Pattern Recogn.* , 2004 37( 5 ) :977-997.

作者简介 张煜东( 1985—),男,江苏苏州人,在读博士生,主要研究领域为图像处理和神经网络。E-mail :zhangyudongnu-aa@gmail.com

吴乐南( 1952—),男,安徽枞阳人,博士,教授,博士生导师,研究领域为数据压缩和多媒体信号处理。

韦 耿( 1977—),男,广西河池人,博士后,主要从事图像超分辨率的研究。