

DOI:10.16136/j.joel.2023.10.0654

连续闪烁抑制范式实验平台设计及其效果检测

陈 或^{1*}, 刘瑞玺¹, 阎锦婷², 程凯文^{3*}

(1. 天津理工大学 聋人工学院, 天津 300380; 2. 沧州师范学院 教育学院, 河北 沧州 061001; 3. 四川外国语大学 语言智能学院, 重庆 400031)

摘要:连续闪烁抑制范式(continuous flash suppression paradigm, CFS)是当前最新的意识下视觉感知研究范式。然而,由于目前尚缺乏成熟的可视化的CFS范式视觉实验平台,严重制约了相关研究的进展。鉴于此,本文采用标准化精密光学元件搭建了CFS范式实验硬件系统,利用MATLAB下的Psychtoolbox工具箱研制了可视化CFS范式实验软件系统,成功试制了CFS范式视觉实验平台。其中,实验软件系统不仅提供了功能完备、设置方便的实验参数可视化设置界面,而且开发并集成了具备不同物理特性的蒙德里安掩蔽图片自动生成程序。为验证CFS范式视觉实验平台的性能,本文设计并开展了图片和视频刺激的意识下视觉感知实验,展现了实验平台良好的工作性能。总体而言,视觉实验平台实验设计方便、掩蔽效果良好、程序运行稳定、数据存取便捷,可以更好地服务于CFS相关心理物理学实验的设计与开展,有效提升无意识视觉认知研究的水平。

关键词:意识下视觉感知; 连续闪烁抑制(CFS); 硬件设计; 软件开发; 掩蔽刺激自动生成

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)10-1105-06

Design and evaluation of an experimental platform based on continuous flash suppression

CHEN Yu^{1*}, LIU Ruixi¹, YAN Jinting², CHENG Kaiwen^{3*}

(1. Technical College for the Deaf, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China; 2. School of Education, Cangzhou Normal University, Cangzhou, Hebei 061001, China; 3. College of Language Intelligence, Sichuan International Studies University, Chongqing 400031, China)

Abstract: The continuous flash suppression paradigm (CFS) is currently the most up-to-date subconscious visual perception research paradigm. However, due to the lack of mature visual experiment platform, the progress of CFS-related research is seriously restricted. In view of this, our team have designed a CFS-based visualization experiment platform including a hardware system developed with standardized precision optical components and a software system developed with Psychtoolbox under MATLAB. Among them, the experimental software system not only provides a fully functional and convenient visualization setting interface for experimental parameters, but also creates an automatic program for the generation of Mondrian masking images with different physical features. In order to evaluate the performance of the experimental platform, we have carried out a subconscious visual perception experiment with picture and video stimuli. The results show that the experimental platform can provide convenient experimental settings, good masking effect, stable program running, and easy data access. It can better serve the design and development of psychophysical experiments related to CFS and effectively improve the level of unconscious visual cognition research.

Key words: subconscious visual perception; continuous flash suppression (CFS); hardware design; software development; automatic generation of masking stimuli

* E-mail: chenyu@tjut.edu.cn; kevin_cheng78@163.com

收稿日期: 2022-09-22 修订日期: 2022-11-25

基金项目: 2019年度国家自然科学基金重点项目(17AZD037)资助项目

0 引言

自2004年被首次提出以来,连续闪烁抑制范式(continuous flash suppression paradigm, CFS)迅速成为意识下视觉感知研究的重要研究范式,推动了视觉心理学及相关领域的快速发展^[1,2]。CFS范式通过双眼分视,向被试者的一只眼睛呈现一系列按照特定频率变化的高对比度的蒙德里安图片,以引起被试者持续高度注意这些蒙德里安图片,从而达到掩蔽向其另一只眼睛所呈现的静态刺激或动态浮现刺激的目的。现有研究表明,CFS范式具备良好的视觉抑制效果,对于目标刺激的掩蔽时间可长达数秒^[3],特别适合探索无意识视觉感知和加工^[4]、视觉意识突破^[5,6]等问题。目前,利用CFS范式所开展的意识下视觉感知研究,所涉及的目标刺激主要是文字^[7,8]和图片^[9,10]等静态刺激,尚缺乏以视频为目标刺激的相关研究报道。

在实验硬件和软件研制方面,目前尚缺乏统一规范的实验硬件系统,而公开发布的与CFS范式相关的工具包仅有两套。2017年,NUUTINEN等^[11]发布了CFS matlab toolbox软件包。该软件包允许实验人员通过修改CSV文件设置视觉实验参数,运行CFS范式实验并将实验结果数据输出为文本文件。由于该软件包缺乏可视化的操作界面,且存在实验参数设置繁多、掩蔽图片自动生成能力不足、程序架构过于臃肿等明显缺点,导致其未能在领域内得到推广应用。2022年,WANG等^[12]发布了CFS crafter软件包。该软件具备可视化界面并提供刺激图片自定义制作功能,可以用来自动创建CFS范式刺激图像序列。然而,作为一种图像属性分析工具,CFS crafter软件包只具有CFS范式刺激和掩蔽图片属性的分析功能,而缺乏掩蔽图片自动生成和CFS范式实验功能。由于缺乏成熟的实验平台,以往的CFS范式实验需要研究者自行制作实验硬件和软件工具,故而开展CFS范式实验的技术门槛较高。尤其是在掩蔽刺激方面,此前的实验设计需要研究者手动制作蒙德里安图片,实验设定和参数调整过程费时费力,既给研究者带来了极大不便,也不利于实验结果的复现^[13,14]。正是这些原因的存在,客观上限制了CFS范式在意识下视觉感知研究中的应用。

有鉴于此,本课题组采用标准化的精密光学元件,搭建了操作简单、调节方便的立体视觉实验平台。同时,还利用MATLAB(MathWorks, Natick, MA)和心理物理学工具箱(Psychtoolbox 3,

PTB 3)^[15]设计了与立体视觉实验平台相配套的CFS范式实验软件系统。本软件系统具有如下特点:首先,本系统配备了图形化的实验设计界面,研究人员无需任何编程基础即可开展实验设计、运行和数据提取工作;第二,本软件系统接入了基于Dead Leaves模型的掩蔽刺激自动生成算法程序,实现了对于CFS刺激的精细化控制,提高了掩蔽精度和效果;第三,本软件系统开发了视频刺激实验模块,实现了以视频为目标刺激的CFS范式实验功能,进一步丰富了CFS范式实验的应用场景。设计完成后,课题组还招募被试者开展了以情绪图片和情绪视频为目标刺激的实验,考察了目标刺激属性对于视觉掩蔽抑制突破的影响,验证了实验平台性能,并为接下来的实验平台改进工作提供了思路。

1 CFS范式实验平台硬件设计

CFS范式视觉实验平台的硬件主体是一台课题组采用标准化精密光学元件搭建的光学立体镜。光学立体镜的工作原理如图1所示。

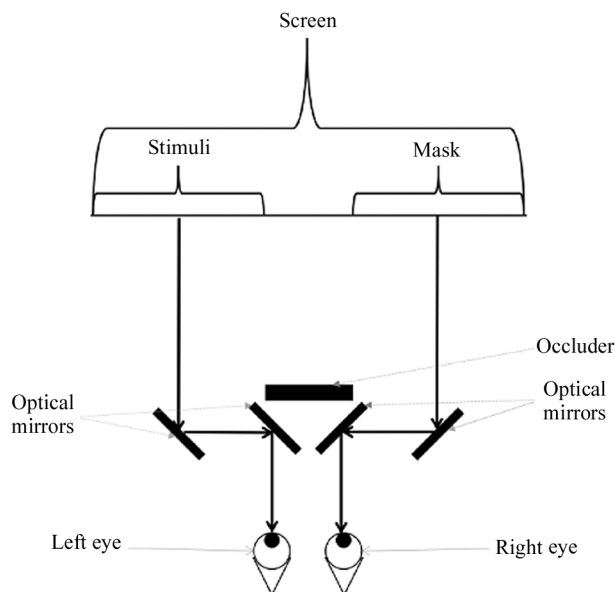


图1 光学立体镜工作原理

Fig. 1 Working principle of optical stereoscope

由图1可见,光学立体镜通过处于近处中央位置的遮挡物将左右眼的视野分隔开来,通过两组反射镜实现左、右眼视觉与不同注视对象(目标刺激、掩蔽刺激)的连通。由于呈现给两眼的视觉刺激具有不同的刺激强度和频闪特性,人的视觉注意会被刺激强度高且处于动态变化的掩蔽刺激所吸引,致使左、右眼视野在远端融合后,刺激强度较低且处于

相对静止状态的目标刺激会在较长时间内处于“不可见”状态。

基于上述原理,课题组采用标准化精密光学元件,并结合自制遮挡板及固定附件搭建了立体视觉实验平台。该平台由一个遮挡板、一个导轨、四个铝反射加强镜及配套的镜框和立杆固定器等硬件组成。其中,在与镜框连接的支杆与立杆之间以松紧器连接,并可由松紧器调节镜片角度和高度;导轨与立杆之间由滑块连接并可经由滑块上的固定螺钉调节各镜片间的相对位置。在此基础上,课题组还为其配备了一个头部支撑系统,以在实验过程中保持被试者眼部平视、避免头痛、缓解疲劳。

2 CFS 范式实验平台软件开发

CFS 范式实验平台软件系统采用 M 脚本语言编写,使用 Psychtoolbox3 工具箱搭建程序框架。该软件系统的程序框架如图 2 所示。首先,通过 Screen(‘OpenWindow’)^[16] 函数指令弹出实验窗口,运用 SkipSyncTests 和 VisualDebuglevel 指令强制跳过屏幕自检和屏幕参数确认,以最大化减少 Psy-

chtoolbox 工具箱的启动时间。接下来,通过 windowPtr 指令获取屏幕大小和分辨率信息并返回给 rect 函数句柄,启动 BlendFunction 来设置当前 Alpha 混合模式和窗口“window Index”的颜色缓冲区并写入位屏蔽,同时返回和设置实验窗口的颜色编码。运用 RectCenter 指令控制左右融合方框的中心位置,此时左右两个融合方框的位置是相对于屏幕中心对称的,根据相对左右融合方框位置来自动调整刺激和掩蔽显示的大小以及位置,分别在两个左右方框中心绘制十字注视标志。最后,使用 Flip 指令操作帧刷新,完成控制掩蔽和实验刺激播放过程。整个实验过程使用 GetSecs 函数计时,其时间精准度达到 0.001 s,所新建的变量 StartTime 记录实验开始时间,secsKey 记录被试者反应按下按键的时间。实验结束时,close 自动关闭实验窗口,clear 清理实验程序产生的其他变量。该程序架构程序语句精炼,极大降低了实验运行过程中的内存占用。

借鉴前人有关工具箱的开发经验^[17],课题组先将各个功能包装为独立模块,再将各功能模块组合成一个整体,以确保软件系统程序运行快速稳定、程

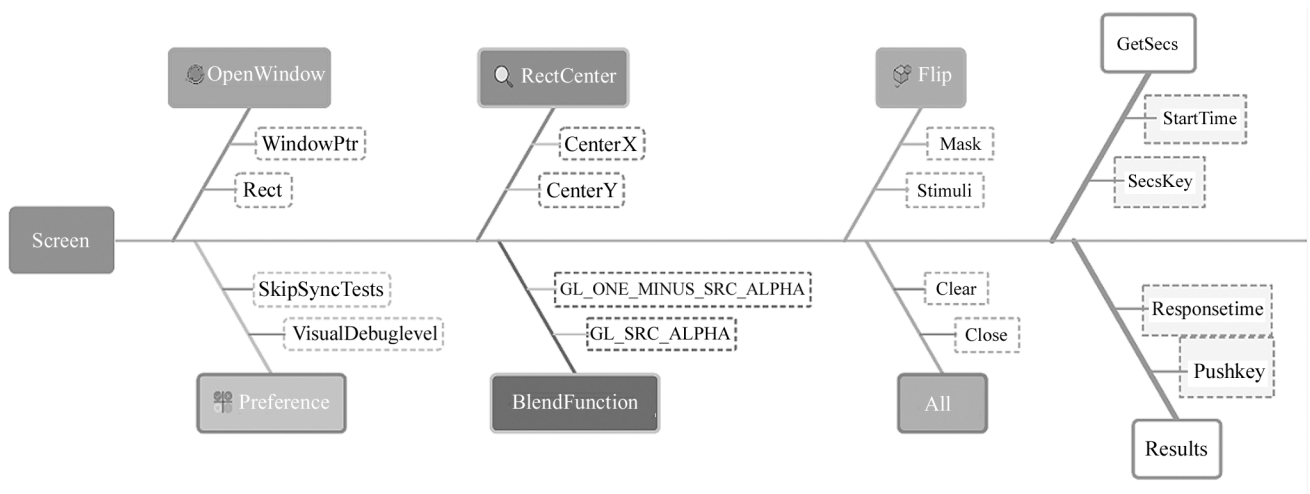


图 2 CFS 范式程序运行流程
Fig. 2 CFS paradigm program running process

序框架简洁且易于扩展。

3 掩蔽刺激自动生成模块开发

鉴于以往基于 CFS 范式的实验需要研究者自行制作蒙德里安掩蔽图片,过程繁琐、低效且灵活性不足,课题组基于 Dead Leaves 模型^[18,19]开发了掩蔽自动生成算法程序,并将其接入到 CFS 实验软件系统之中。这样,实验人员只需控制掩蔽类型、掩蔽色块

大小、颜色范围 3 个参数,便可以直接生成多种不同掩蔽图片并开展实验。

作为一种通过分析功率谱测量图片的纹理模糊的方法,Dead Leaves 模型主要应用于图像压缩用途。其中,Dead Leaves 模型概念如图 3 所示。在图 3 中,子图①是一帧随机输入的原图片;子图②是对子图①纹理模糊的结果图,由光电转换函数和噪声测量计算的大量随机圆盘或矩形以阶梯式叠加组

成;子图③是子图①的边缘空间频率响应结果图,用于比较边缘与纹理模糊结果,以进一步分析图像质量。

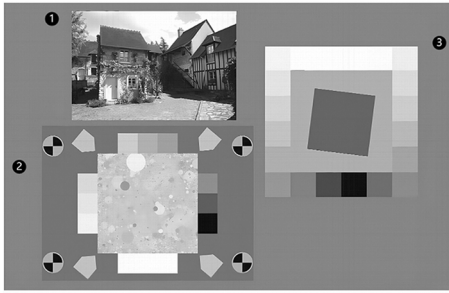


图3 Dead Leaves模型的概念图

Fig.3 Schematic diagram of the Dead Leaves mode

Dead Leaves模型的噪声分布基本原理详见文献[17],现简要描述如下:

首先,两个圆盘给定点 a 的距离 x 属于同一对象,进行概率 $P_{\text{same}}(x)$ 计算,在平稳性上,

$$P_{\text{same}}(x) = \frac{p_2(x)}{p_1(x) + p_2(x)}, \quad (1)$$

式中, $p_2(x)$ 是未被任何其他对象遮挡最前面对象的概率,均包含里面的两个点,而 $p_1(x)$ 是该对象恰好包含两点里其中一个点的概率。由此,可导出条件概率表达式:

$$g(x, r) = \Pr\{x_2 \in A \mid x_1 \in A; ||x_1 - x_2|| = x\}, \quad (2)$$

对于半径为 r 的圆 A ,在无因次量 $\xi = x/r$ 中的表达式如下:

$$\begin{aligned} \tilde{g}(0 \leq \xi \leq 2) &= \\ \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\xi}{2}\right) - \frac{\xi}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{2}\right)^2} \right], \\ \tilde{g}(\xi) &= 0, \text{ and } \xi > 2. \end{aligned} \quad (3)$$

在此模型中,圆盘的半径是分布的 $1/r^3$,其中 $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$,然后有:

$$\begin{aligned} p_1(x) &= 2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [1 - g(x, r)] p(r) dr \\ p_2(x) &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} g(x, r) p(r) dr. \end{aligned} \quad (4)$$

由此可得:

$$p(r) dr \approx \frac{dr}{r \ln\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)}. \quad (5)$$

所在处是图像中给定点属于半径在区间 $[r, r + dr]$ 内的对象的概率。将上述方程代入式(1),可得:

$$P_{\text{same}}(x) = \frac{B(x)}{2 \ln\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right) - B(x)}, \quad (6)$$

$$\text{和 } B(x) = \int_{\frac{r_{\min}}{x}}^{\frac{r_{\max}}{x}} \tilde{g}\left(\frac{1}{u}\right) \frac{du}{u}. \quad (7)$$

上面的 $\tilde{g}(\xi)$ 通过式(3)给出。

为简化上述积分,近似方程中的函数具有三阶多项式 $\tilde{g}_{\text{poly}}(\xi)$ 。最佳拟合可得:

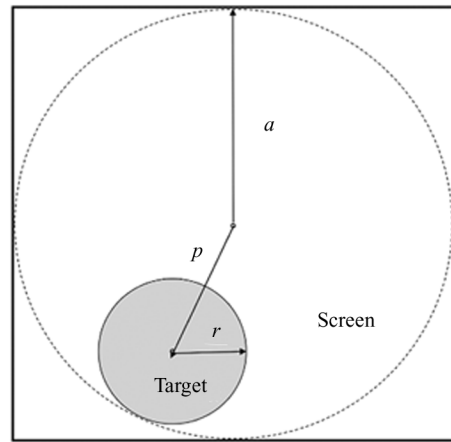
$$\tilde{g}(\xi) \approx \tilde{g}_{\text{poly}}(\xi) = a_3 \xi^3 + a_2 \xi^2 + a_1 \xi + a_0, \quad (8)$$

式中,系数 $a_0 = 1.0, a_1 = -0.61, a_2 = -0.051, a_3 = 0.052, 0 \leq \xi \leq 2$ 。

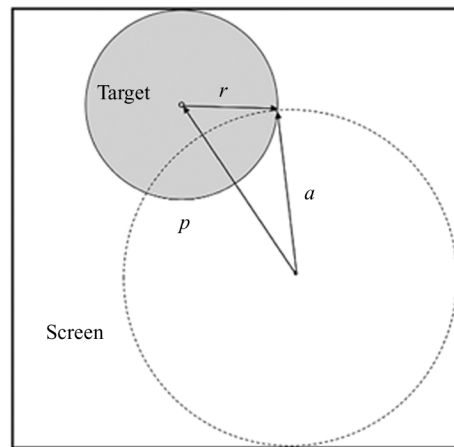
将式(8)插入式(7)导出 $B(x)$ 的数值估计,从而得到式(6)中 P_{same} 的数值表达式。对于 $2r_{\min} \leq x < 2r_{\max}$ 可得:

$$\begin{aligned} B(x) \approx & \frac{a_3}{3} (8 - u^3) + \frac{a_2}{2} (4 - u^2) + \\ & a_1 (2 - u) + a_0 \ln\left(\frac{2}{u}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

此时 $u = \frac{x}{r_{\max}}$,至此,即可生成一个多个色块组成的掩蔽图片,如图4(a)、(b)所示。



(a) The small disk appears on the large disk

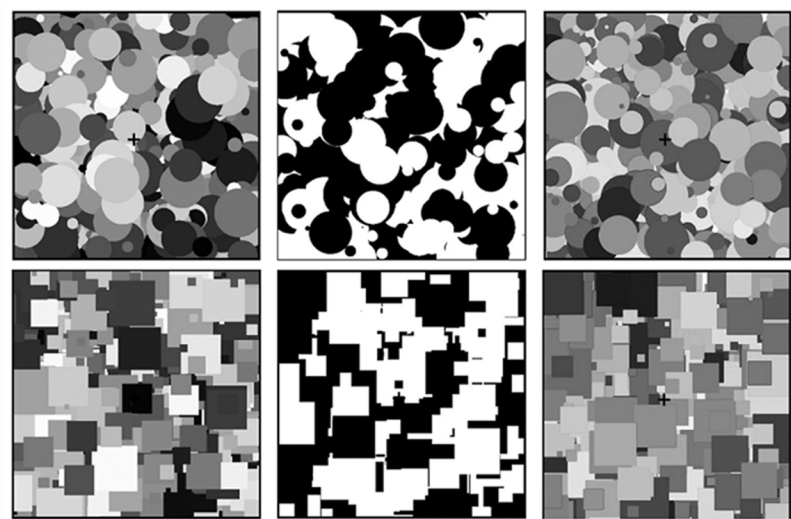


(b) The large disk overlaps

图4 圆盘状随机半径以及两种不同位置情况的分布
Fig.4 Distribution of disks-shaped random radii and two different positions

根据上述原理,课题组对 Dead Leaves 模型进行了改造并植入 CFS 范式实验系统,实现了掩蔽图片的自动生成,如图 5 所示。由图 5 可知,运用改进后 Dead Leaves 的掩蔽自动生成程序,可以自动生成 3

种色彩类型(灰度、黑白、彩色)和两种形状类型(圆盘、方块)组成的多种蒙德里安图片,以根据不同实验需要生成不同物理特性的掩蔽图片、从而实现最大化掩蔽目标刺激之目的。



(a) Gray disk and block (b) Black and white disk and block (c) Color disk and block

图 5 Dead Leaves 模型下生成的 3 种颜色、随机多种形态的蒙德里安图片

Fig. 5 Mondrian images with three colors and random shapes generated under Dead Leaves models

4 实验验证

在完成实验平台搭建、运行调试工作后,课题组以情绪图片和情绪视频为目标刺激开展了实验验证,在考察目标刺激属性对于视觉掩蔽抑制突破影响的基础上,进一步验证了实验平台性能。

验证实验纳入 6 名被试者,均为天津理工大学在读学生。被试者年龄为 24—28 岁之间,视力或矫正视力 1.0 以上,无斜视等视力缺陷。所有被试者均征得本人口头同意,实验完成后均获得金钱报酬。

实验材料由 30 张中性表情人脸图片和 30 条时长为 1 s 的中性人脸视频片段组成,均来自中国大学生动态情绪面孔库^[20]并得到使用授权。其中,中性人脸图片均取自中性情绪视频片段,为各情绪视频片段中性情绪达到峰值时的视频截图。所有材料掩蔽图片材料均采用彩色方块图片,掩蔽频率为 10 Hz。总体上,验证实验的图片刺激和视频刺激材料混合随机出现在被试者非优势眼视域的中心位置上,各试次对被试者优势眼实施掩蔽以考察非优势眼突破抑制情况,实验采取意识突破的判断任务,要求被试者感觉到屏幕出现人脸时立即按下键盘上的 Z 键,实验记录了被试者的意识突破时间,即反应时数据。

剔除异常空值数据后,课题组采用独立样本 *t* 检

验对图片刺激和视频刺激的反应情况开展了统计分析。两类刺激的描述性统计如图 6 所示(其中,1 为图片,2 为视频),图片刺激和视频刺激的反应时间分别为 0.933 s ($SD = 0.602$ s) 和 1.084 s ($SD = 0.587$ s),图片刺激的意识突破时间短于视频刺激的意识突破时间。*t* 检验的结果显示: $t = -2.404$, $df = 354.65$, $p = 0.017$,两种目标刺激的反应时间差异显著。综合上述结果可知,相对于中性情绪达到峰值的情绪图片,被试者需要更长的反应时间突破抑制,以感知情绪逐渐累加,并达到峰值的情绪视频片段。更为重要的是,这些结果还提示,实验软件系统

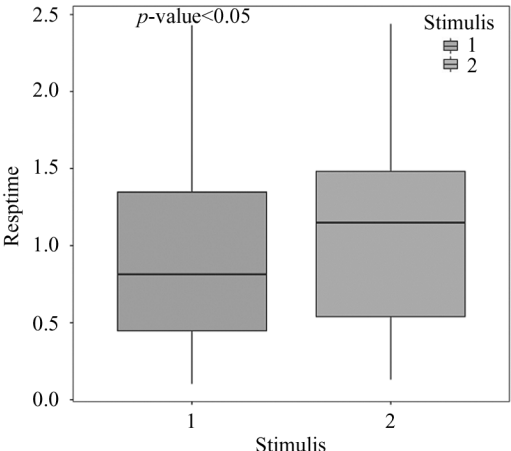


图 6 *t* 值检测结果

Fig. 6 *t*-value detection result

自动生成的掩蔽图片具备良好的掩蔽能力,能够有效掩蔽包括具有较强动态性的视频刺激在内的各种目标刺激。

5 结 论

总体而言,本课题组所开发的 CFS 范式硬件平台和软件系统是可靠稳定的,基于改造 Dead Levels 所生成的掩蔽图片具有良好的掩蔽性能,因而在验证实验中展现了良好效果。本系统的成功开发降低了 CFS 范式实验的技术门槛,节省了研究者的时间,规范了掩蔽刺激的参数设定及效果。因此,本实验平台的开发工作完成之后,必将为无意识心理学实验研究设计过程带来便利,并有效缩短实验周期。

鉴于目前本实验平台尚处于开发过程中,其硬件系统还存在物理参数调节不够灵活,其软件系统还存在诸如实验参数设置范围有所欠缺、软件运行无法自动纠错、软件界面不够美观等问题。

针对上述不足,未来课题组将会着力改进实验硬件系统,继续开展软件各种特性的调参工作,尽力提升软件自动生成掩蔽图片的掩蔽效果,以继续优化 CFS 范式心理学实验平台的框架架构,提升该实验平台在无意识视觉心理学实验研究中的应用价值。

参考文献:

- [1] TSUCHIY A N, KOCH C. Continuous flash suppression[J]. *Journal of Vision*, 2004, 4(8): 61.
- [2] TSUCHIYA N, KOCH C. Continuous flash suppression reduces negative afterimages [J]. *Nature Neuroscience*, 2005, 8(8): 1096-1101.
- [3] TSUCHIYA N, KOCH C, GILROY L A, et al. Depth of interocular suppression associated with continuous flash suppression, flash suppression, and binocular rivalry [J]. *Journal of Vision*, 2006, 6(10): 1068-1078.
- [4] YANG E, ZALD D H, BLAKE R. Fearful expressions gain preferential access to awareness during continuous flash suppression[J]. *Emotion*, 2007, 7(4): 882-886.
- [5] ZHAN M, DE GELDER B. Unconscious fearful body perception enhances discrimination of conscious anger expressions under continuous flash suppression[J]. *Neuropsychologia*, 2019, 128: 325-331.
- [6] VIEIRA J B, WEN S, OLIVER L D, et al. Enhanced conscious processing and blindsight-like detection of fear-conditioned stimuli under continuous flash suppression [J]. *Experimental Brain Research*, 2017, 235(11): 3333-3344.
- [7] PRIOLI S C, KAHAN T A. Identifying words that emerge into consciousness: effects of word valence and unconscious previewing [J]. *Consciousness and Cognition*, 2015, 35: 88-97.
- [8] CHENG K, DING A, JIANG L, et al. Emotion in Chinese words could not be extracted in continuous flash suppression[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: 309.
- [9] ENGELL A D, QUILLIAN H M. Faces under continuous flash suppression capture attention faster than objects, but without a face-evoked steady-state visual potential: is curvilinearity responsible for the behavioral effect? [J]. *Journal of Vision*, 2020, 20(6): 14.
- [10] YANG Y H, YE H S L. Unconscious processing of facial expression as revealed by affective priming under continuous flash suppression [J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2018, 25(6): 2215-2223.
- [11] NUUTINEN M, MUSTONEN T, HÄKKINEN J. CFS MATLAB toolbox: an experiment builder for continuous flash suppression (CFS) task [J]. *Behavior Research Methods*, 2018, 50(5): 1933-1942.
- [12] WANG G, ALAIS D, BLAKE R, et al. CFS-crafter: An open-source tool for creating and analyzing images for continuous flash suppression experiments [J]. *Behavior Research Methods*, 2022, 55: 2004-2020.
- [13] ZHU W, DREWES J, MELCHER D. Time for awareness: the influence of temporal properties of the mask on continuous flash suppression effectiveness [J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0159206.
- [14] ZHAN M, ENGEL T, DE GELDER B. Influence of continuous flash suppression mask frequency on stimulus visibility [J]. *Neuropsychologia*, 2019, 128: 65-72.
- [15] KLEINER M, BRAINARD D, PELLI D, et al. What's new in psychtoolbox-3 [J]. *Perception*, 2007, 36 (14): 1-16.
- [16] KUSANO T, AKUTSU H. Introduction to psychtoolbox [J]. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 2013, 32 (1): 145-151.
- [17] HARTMANN T, WEISZ N. An introduction to the objective psychophysics toolbox [J]. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11: 585437.
- [18] LEE A B, MUMFORD D, HUANG J. Occlusion models for natural images: a statistical study of a scale-invariant dead leaves model [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2001, 41(1): 35-59.
- [19] GOUSSEAU Y, ROUEFF F. The dead leaves model: general results and limits at small scales [EB/OL]. (2003-12-01) [2022-09-22]. <https://arxiv.org/abs/math/0312035>.
- [20] LIU J C, RAN G M, ZHANG Q, et al. The development of Chinese undergraduate dynamic affective facial database [J]. *Chinese Journal of Applied Psychology*, 2021, 27(3): 234-243.
刘俊材, 冉光明, 张琪, 等. 中国大学生动态情绪面孔库的构建 [J]. *应用心理学*, 2021, 27(3): 234-243.

作者简介:

陈 彧 (1981—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事计算机技术、认知计算等方面的研究。

程凯文 (1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事认知神经科学和语言智能等方面的研究。