

## 基于情感模糊计算的恐怖谷效应起因分析

钟翔伟<sup>1</sup>, 王军锋<sup>1</sup>, 留沧海<sup>2</sup>, 蒋刚<sup>2</sup>

(1.西南科技大学 制造科学与工程学院, 绵阳 621000;

2.西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳 621000)

**摘要:** **目的** 分析产生恐怖效应的原因。**方法** 根据认知心理学, 假设恐怖谷效应的产生来自一种情绪表征的逆向强化反应, 并通过语义量化及感性分析手段定义情感模糊的计算公式, 通过虚拟的实验平台设计实验, 对所提假设进行验证。**结论** 实验的结果支撑了所提出的假设, 给出了恐怖效应的数学解释。

**关键词:** 恐怖谷效应; 仿人机器人; 认知心理学; 虚拟现实; 情感模糊计算

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)14-0190-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.14.035

## An Analysis of the Causes of Uncanny Valley Effect Based on Emotional Fuzzy Computation

ZHONG Xiang-wei<sup>1</sup>, WANG Jun-feng<sup>1</sup>, LIU Cang-hai<sup>2</sup>, JIANG Gang<sup>2</sup>

(1.School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China; 2.Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

**ABSTRACT:** It analyzes the causes of uncanny valley effect. It is from cognitive psychology. It assume that the uncanny valley effect is produced by an inverse behavior from an emotional representation. To define the user 's emotional fuzzy calculation formula of humanoid robot the Semantic quantification and perceptual analysis is used. The results of the experimental data analysis support the proposed hypothesis. It gives a mathematical explanation of the causes of terrorist effects.

**KEY WORDS:** uncanny valley effect; cognitive psychology; humanoid robot; virtual reality; emotion fuzzy calculation

仿人机器人产业化是市场发展的必然趋势, 在此趋势下, 从设计层面提升服务机器人的用户体验越发迫切。然而, 一种名为恐怖谷效应的现象限制了用户对机器人的好感度的提升, 阻碍了仿人机器人的用户体验发展。1970年森政弘教授提出了恐怖谷现象<sup>[1]</sup>, 引起了全世界学者的广泛关注。虽然该现象能在实验及现实中被明显观察到, 并有众多学者对其起因进行了研究, 但只有少量研究对该现象给出了量化的解释<sup>[2-4]</sup>。森政弘教授曾尝试采用一种立方函数对恐怖谷现象进行解释, 但这一解释随后被 Pütten 等学者的研究所否定<sup>[5-6]</sup>。Cindy Bethel 等采用核磁共振方法, 研究

了人在观察机器人各种交互行为时, 大脑中兴奋神经元的分布情况, 但未进一步解释恐怖谷效应起因<sup>[7]</sup>。学者 Moore 等采用贝叶斯算法构建数学模型, 对恐怖谷现象进行了推演<sup>[8]</sup>。另外, 曾较被认同的陌生人回避理论, 最近已被 Karl 等学者的研究所否定<sup>[9]</sup>。

由于目前存在诸多未攻破的技术壁垒, 所以一般采用超现实的表现手段, 刻意避免追求拟人效果, 牺牲部分用户体验对恐怖谷效应进行回避。随着市场对高品质仿人机器人需求的增长, 有必要对恐怖效应起因进行量化分析, 从设计层面上帮助仿人机器人获得更优的用户体验。

收稿日期: 2018-03-02

作者简介: 钟翔伟 (1992—), 男, 江西人, 西南科技大学硕士生, 主攻工业设计工程。

通信作者: 王军锋 (1981—), 男, 陕西人, 博士, 西南科技大学副教授, 主要研究方向为交互设计。

### 1 恐怖谷起因的认知心理学假设

森政弘教授指出,人对机器人的好感度会随着机器人于人的相似度的提升而增加,但是当相似度达到了一个特定程度时,人对机器人的好感度会突然下降到谷底。只有当机器人的外表、动作相对于人的相似度继续上升到一定值时,人类对机器人的感觉才会变回正面<sup>[1]</sup>。恐怖谷曲线图见图 1。

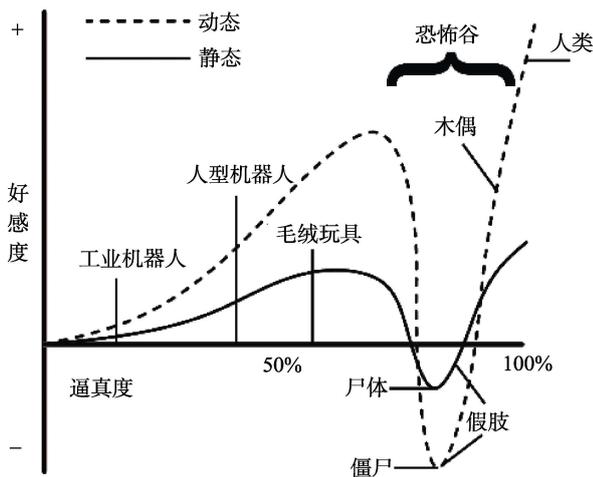


图 1 恐怖谷曲线图  
Fig.1 Uncanny valley curve

有资料表明,对非人类个体和人类的感知会导致不同的激活模式。当观察机器人时,感知厌恶的左前脑岛、感知愤怒的眶额皮质等参与情绪加工的脑区神经活动会减少<sup>[10]</sup>,机器人本应该有近似于人类感知的脑区神经激活模式,但却呈现出了非人类个体的脑区神经激活模式。

认知心理学表明<sup>[11]</sup>,恐怖谷效应的差异感知失真现象,本质是一种人类对不同强弱关注度信息处理的结果<sup>[12-13]</sup>,此处将这种差异感知失真定义为情绪表征逆向强化反应。为便于理解,对假设进行形象说明,情绪表征逆向强化反应举例见图 2。

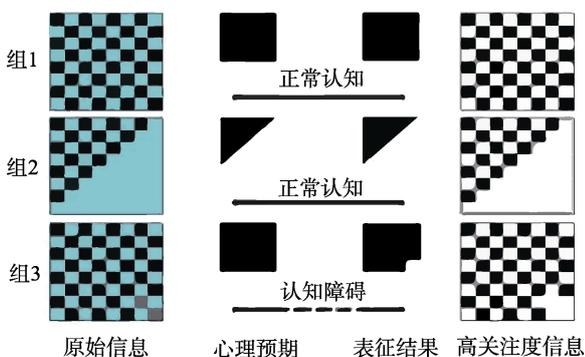


图 2 情绪表征逆向强化反应举例  
Fig.2 Examples of Reverse reinforcement effect of Emotional Translation

人类的生理结构决定了其在观察事物时,眼睛会对信息进行选择性提取<sup>[14]</sup>。首先第一眼看到事物时会综合其所有信息,并根据自身过往经验做出一个心理预期,然后进一步对事物信息进行处理,高关注度信息的印象被加强、低关注度信息的印象被减弱。再之后,大脑会对之前形成的对高关注信息的印象,进行再加工,最后信息的表征结果会用来与心理预期进行对比,以确定认知是否正常,从而给出对应的情绪判定。在图 2 中,组 1、2 中的翻译结果和心理预期相同,认知正常,因此分别得到了对应正方形、对应三角形的情绪判定。组 3 的原始信息与组 1 的原始信息相类似,但其右下角处的两个黑色点相对组 1 中的略浅。人们第一眼看到组 1、组 3 时都得到了正方形的心理预期,但在对事物信息进行处理的过程中,本应当被视为高关注度信息的上述色点,却被进行了等同于低关注度信息的印象减弱,最终导致了组 3 的表征结果和心理预期相异,引起了认知障碍。

### 2 恐怖谷起因分析数学建模

#### 2.1 计算量定义

人对事物的心理感受来自对事物的关注程度、认知程度和认可程度等 3 种因素的相互作用,其中关注程度是认知程度及认可程度的先决条件,认知程度直接影响认可程度<sup>[11]</sup>。根据森政弘教授等的研究,造成恐怖谷现象的心理因素在于人类的生物觉本能以及人类的移情效应,包括认知移情、运动移情、情感移情。

通过语义范畴化<sup>[15]</sup>将对“死亡的恐惧”概括为“有生命”、“无生命”(用  $L$  表示)。将“对病态异类的排斥”概括为“健康的”、“病态的”(用  $H$  表示)。将“认知移情”概括为“易理解”、“难理解”。将“运动移情”概括为“易模仿”、“难模仿”(用  $C$  表示)。将“情感移情”概括为“易共鸣”、“难共鸣”(用  $R$  表示)。

#### 2.2 计算量化

Brenton 及 Misselhorn 等<sup>[16]</sup>指出,恐怖谷现象难以被解释还可能是因为在对森政弘教授给出的评价机器人的词语进行翻译时,出现了翻译误差。人类的语言存在语义模糊性<sup>[17]</sup>。人类在使用语言描述自身对机器人的心理感受时,不同的人表述同一心理感受时使用的语词可能存在差异,一个语词所包含的语义可能涉及多个维度的心理感受的表述。本研究通过文献查找、头脑风暴、聚类等方法整理了 33 对人类可能用于描述自身对机器人交互行为的心理感受的心理量表征语词<sup>[18-19]</sup>,然后随机对 60 名来自各专业的在校大学生进行测试,标定该 33 对语词与上述  $L, H, U, C, R$  等 5 个维度的相关度,得出的心理量表征语词标定结果见表 1。

表 1 心理量表征语词标定结果  
Tab.1 Word calibration results for psychometric representation

序号	词汇	(L)	(H)	(U)	(C)	(R)
		有生命—无生命	健康的—病态的	易理解—难理解	易模仿—难模仿	易共鸣—难共鸣
1	灵活—迟钝	0.23	0.25	0.23	0.15	0.14
2	冷酷—热情	0.23	0.20	0.15	0.21	0.21
3	巧妙—蠢笨	0.21	0.20	0.22	0.19	0.19
4	体贴—虐待	0.20	0.20	0.21	0.16	0.23
5	阴柔—阳刚	0.2	0.22	0.17	0.16	0.18
6	端正—扭曲	0.14	0.23	0.24	0.20	0.19
7	亲切—冷漠	0.23	0.21	0.20	0.10	0.26
8	焦躁—平和	0.22	0.19	0.21	0.17	0.21
9	协调—突兀	0.16	0.16	0.22	0.21	0.25
10	轻快—压抑	0.17	0.26	0.21	0.17	0.19
11	稳重—轻佻	0.18	0.16	0.23	0.20	0.23
12	可爱—可憎	0.16	0.20	0.24	0.16	0.24
13	吓人—泰然	0.22	0.19	0.17	0.20	0.22
14	正常—诡异	0.17	0.23	0.21	0.16	0.23
15	灵性—呆板	0.24	0.17	0.20	0.20	0.18
16	同步—延迟	0.12	0.17	0.25	0.23	0.22
17	温柔—粗暴	0.17	0.21	0.22	0.19	0.22
18	合适—不适	0.18	0.22	0.24	0.13	0.23
19	滑稽—严肃	0.22	0.15	0.22	0.16	0.25
20	保护性—侵犯性	0.20	0.21	0.23	0.16	0.21
21	反应快—反应慢	0.20	0.21	0.21	0.17	0.21
22	熟悉—陌生	0.19	0.11	0.27	0.20	0.24
23	有爱—无情	0.10	0.09	0.13	0.07	0.60
24	有力—无力	0.23	0.21	0.19	0.18	0.19
25	紧张—放松	0.22	0.19	0.20	0.20	0.19
26	快速—缓慢	0.19	0.19	0.22	0.22	0.18
27	兴奋—沉静	0.21	0.21	0.18	0.18	0.22
28	生动—僵硬	0.26	0.20	0.19	0.14	0.21
29	女性化—男性化	0.23	0.19	0.22	0.17	0.18
30	积极—消极	0.19	0.26	0.20	0.14	0.20
31	活跃—被动	0.25	0.21	0.16	0.19	0.20
32	细心—马虎	0.18	0.20	0.22	0.19	0.20
33	得体—不当	0.18	0.19	0.23	0.17	0.23

为方便计算，采用 Likert 量表将量 #<sub>L</sub> 划分为 5 个等级。对应量 #<sub>L</sub> 的划分，将量 #<sub>L</sub> 也划分为 5 个等级（同法对 #<sub>H</sub>，...及 #<sub>H</sub>，...等量进行划分，此处不再

复述）。本研究在 X<sub>L</sub>，X<sub>H</sub>，X<sub>U</sub>，X<sub>C</sub>，X<sub>R</sub> 的标定过程中，按上述量划分对应关系，然后随机对 60 名来自各专业的在校大学生进行测试，标定的结果见图 3。

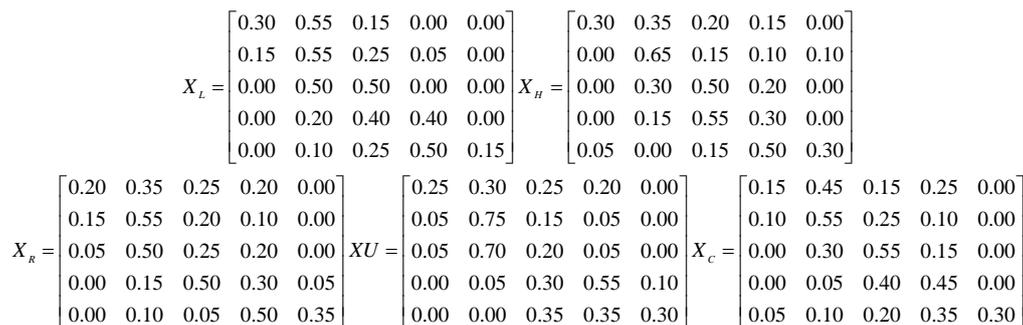


图 3 心理量模糊关系标定结果  
Fig.3 Fuzzy relationship calibration results of Psychological quantity

将量 @<sub>L</sub> 划分为关注、较关注、适中、较忽视、忽视等 5 个等级, 分别用 @<sub>L1</sub>、@<sub>L2</sub>、@<sub>L3</sub>、@<sub>L4</sub>、@<sub>L5</sub> 表示。将表 1 中的语词划分为“很灵活”、“较灵活”、“适中”、“较迟钝”、“很迟钝”等 5 个等级类似的对表 1 中其他 32 个语词对进行划分。根据表 1 中数据, 对于量 @<sub>L</sub> 进行计算:

$$\begin{aligned}
 @_L &= (@_{L1} \setminus @_{L2} \setminus @_{L3} \setminus @_{L4} \setminus @_{L5}) \\
 @_{L1} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^1(i_j)}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^2(i_j)} \\
 @_{L2} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^2(i_j)}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^3(i_j)} \\
 @_{L3} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^3(i_j)}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^4(i_j)} \\
 @_{L4} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^4(i_j)}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^5(i_j)} \\
 @_{L5} &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^5(i_j)}{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{33} i_j^1 STC^2(i_j)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

注: 式 1 中  $n$  表示对“某机器人交互行为”进行评价的总人数,  $i \in n$ , 表示其中第  $i$  个人;  $1 \leq j \leq 33$ , 表示表 1 中 33 对语词中的第  $j$  对;  $i_j^1$  表示第  $i$  个人所选的第  $j$  对语词在表 1 第 1 列中的标定值;  $STC^2(i_j)$  为一判定量, 其中 ? 表示第  $j$  对语词的第 ? 个划分等级,  $1 \leq ? \leq 5$ , 若在第  $j$  对语词的第 ? 个划分等级上, 第  $i$  个人进行了选择, 则  $STC^2(i_j) = 1$ , 反之  $STC^2(i_j) = 0$ 。

参照公式 1, 类似的可以拟定量 @<sub>H</sub>, @<sub>U</sub>, @<sub>C</sub>, @<sub>R</sub> 的计算式, 此处不在复述。

综上, 根据模糊评价计算规则, 以量 @<sub>L</sub>, @<sub>H</sub>, @<sub>U</sub>, 5@<sub>C</sub>, @<sub>R</sub> 权衡量 #<sub>L</sub>, #<sub>H</sub>, #<sub>U</sub>, #<sub>C</sub>, #<sub>R</sub>, 对量 ♥<sub>L</sub>, ♥<sub>H</sub>, ♥<sub>U</sub>, ♥<sub>C</sub>, ♥<sub>R</sub>, 可拟定公式 2 进行计算:

$$\begin{cases}
 \heartsuit_L = @_L \cdot X_L \\
 \heartsuit_H = @_H \cdot X_H \\
 \heartsuit_U = @_U \cdot X_U \\
 \heartsuit_C = @_C \cdot X_C \\
 \heartsuit_R = @_R \cdot X_R
 \end{cases} \tag{2}$$

同理, 以关注度来权衡心理感觉, 拟定量  $S$  的计算公式:

$$S = [ @_L \quad @_H \quad @_U \quad @_C \quad @_R ] \cdot \begin{bmatrix} \heartsuit_L \\ \heartsuit_H \\ \heartsuit_U \\ \heartsuit_C \\ \heartsuit_R \end{bmatrix} \tag{3}$$

### 3 实验及实验数据分析

#### 3.1 实验设计

人与机器人进行信息交互的过程中, 引起人类产生情感反馈的机器人交互行为主要包括机器人的肢体动作行为、面部表情构成、语言表达。其中语言表达的语音、语调、语法逻辑组成的表意结构模糊性强<sup>[20]</sup>, 不利于控制变量分析。要实现机器人较真实的仿人面部表情变化, 除对仿真皮肤材料要求高外, 还需要在机器人面部设置 20 个左右控制点, 并精确规划控制点的运动幅度与速度, 全过程难度大, 成本高<sup>[21]</sup>。为提高实验效率、控制实验成本, 实验选取机器人肢体动作行为作为切入点, 参照 Angela 等的实验<sup>[22]</sup>, 选取“提壶倒水”这一动作, 作为实验的动作脚本。

为排除人类个性化微表情、环境光影等无关量可能对实验造成的干扰, 将人类的“提壶倒水”的动作过程进行采集, 并使用 3Ds max 软件建立实验模型, 见图 4。

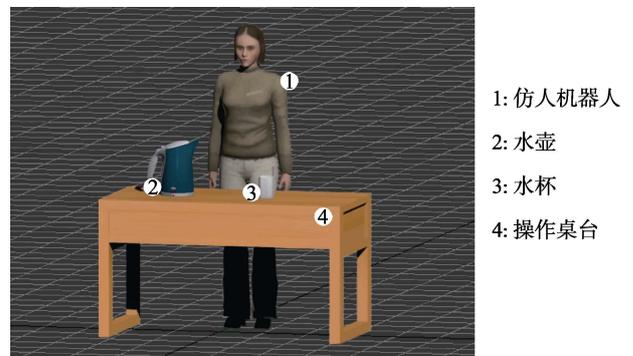


图 4 实验模型示意  
Fig.4 Experimental model

参照 3D 角色动画制作方法<sup>[23]</sup>, 利用动作捕捉系统采集的数据, 驱动机器人模型在虚拟现实空间内完成一组“提壶倒水”的动作, 并将其过程录制成动画视频 1 作为实验组。使用 3Ds max 软件对动画视频 1 中虚拟机器人的“提壶倒水”动作进行细微修改(使机器人在倒水时, 对比动画视频 1, 身体侧旋转 15°, 仅对此处修改, 其他部分保持视频 1 中的行为模式, 动作区别示意图 5, 制作动画视频 2 作为控制组。在不告知两组视频具体何处动作存在差异的前提下, 组织 60 名被试, 随机先后观看两组视频, 并要求其使用语词对评价表进行评价。对评价结果进行统计, 将统计结果代入公式 1、2、3 中进行计算。视频动画截图见图 6。

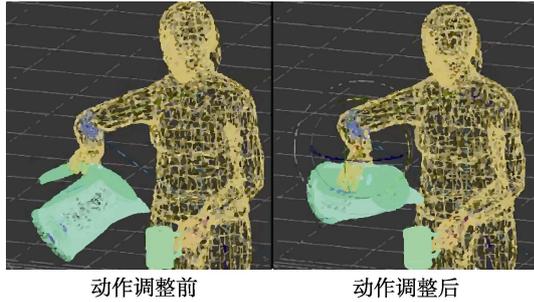


图5 动作区别示意  
Fig.5 Action distinction

3.2 实验数据分析

对实验结果做出如下预估：被试呈现的对动画视

频1的心理综合感受要优于动画视频2；被试呈现的对动画视频1的关注程度要优于动画视频2。实验的部分计算结果见表2，关注度数据分布见图7。

被试对动画视频1的心理综合感受，在等级“很接受”、“接受”上的计算值都明显较动画视频2高，而在等级“拒绝”、“很拒绝”上却明显较动画视频2低，因此证明实验结果符合预估1。被试对视频1关注度的图像主体（关注度高于50）及峰值（关注度高于150）分布在“关注”和“较关注”两个等级范围内。其对视频2的关注度的图像主体分布在“适中”和“较忽视”两个等级范围内，峰值出现于“适中”等级范围内，因此判定被试对视频1的关注度要高于视频2的关注度，实验结果与预估2相符。



图6 视频动画截图  
Fig.6 Video animation screenshots

表2 实验的部分计算结果  
Tab.2 Some calculation results of the experiment

关注度	动画视频 1					动画视频 2				
	关注	较关注	适中	较忽视	忽视	关注	较关注	适中	较忽视	忽视
@ <sub>L</sub>	52.70	154.44	111.42	6.08	0	0.9	19.72	134.28	66.58	6.17
@ <sub>H</sub>	52.15	159.24	122.05	5.94	0	1.05	21.72	136.23	67.34	5.84
@ <sub>U</sub>	58.59	171.64	122.31	5.74	0	1.05	22.08	148.92	72.04	6.95
@ <sub>C</sub>	46.95	139.24	100.35	4.74	0	0.95	18.32	121.71	58.52	5.42
@ <sub>R</sub>	74.52	199.44	144.87	5.50	0	1.05	22.16	178.86	83.52	8.62
心理综合感受	很接受	接受	中立	拒绝	很拒绝	很接受	接受	中立	拒绝	很拒绝
S	282.05	825.20	499.15	270.91	44.35	81.99	540.17	497.80	347.96	73.69

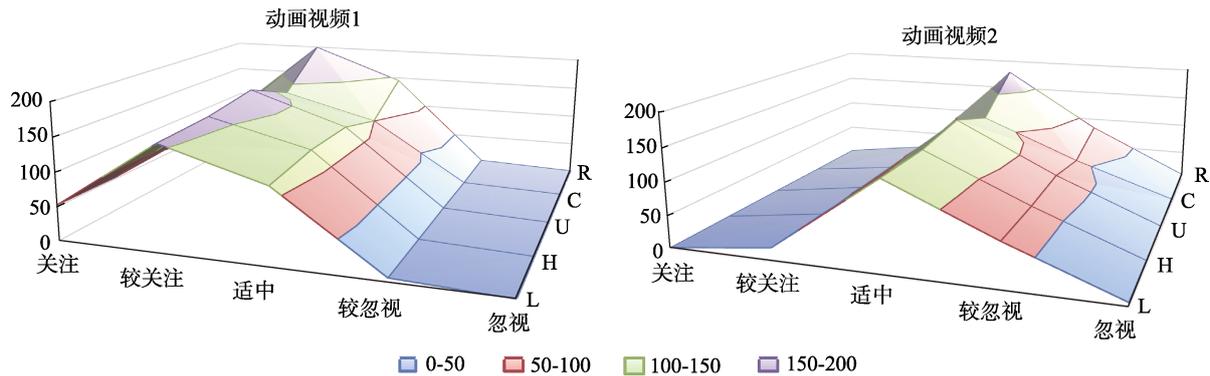


图 7 关注度数据分布  
Fig. 7 Attention data distribution

### 3.3 实验结论及讨论

因为实验结果和预估 1、2 都相符，因此此次实验的结论支持第二节中所提假设。就仿人机器人的行为动作引起的恐怖谷效应给出解释如下：人类在观察仿人机器人行为动作的过程中，机器人行为的异常拉低了整个行为引起的人类关注度，诱发了情绪表征逆向强化反应，从而使人类对该行为的心理感受综合呈现较低水平。

由于目前实验条件限制，语义量化过程中未考虑调查样本的地域局限性等因素的影响，需要在后续研究中扩充样本，并进行重复实验，对多次实验数值结果分布进行 F 检验等统计学分析。

研究涉及人类对事物的认知过程，由于实验条件的限制，在研究过程中选取样本为在校大学生，因此后续的数据分析必然会表现出一定样本特性。虽然通过文献调查发现 Lewkowicz 等采用眼动仪的类似实验<sup>[24]</sup>，其结果对本研究的实验结论提供了佐证，但为使实验更加严谨，后续也需要扩大实验样本采集范围，并结合眼动实验对实验进行优化设计。

## 4 结语

恐怖谷效应可能是由于情绪表征逆向强化反应所导致，从仿人机器人的行为评价进行深入探究，结合语义量化、感性分析方法，拟定情感模糊计算方法，并借助虚拟现实技术，设计控制变量实验，对所提假设进行验证。最后结合实验数据分析对恐怖谷效应的起因进行解释。

研究的结果和结论仅适于解释仿人机器人肢体动作行为引起的恐怖谷效应。仿人机器人静态特征、面部表情构成、语言表达等导致的恐怖谷效应起因还需要进行后续的研究。如何根据本文观点，优化机器人交互行为的信息构成，引起人类的高关注度，指导机器人设计以避免恐怖效应，这些问题还需要继续深入研究。

### 参考文献：

- [1] MORI M, MACDORMAN K F, KAGEKI N. The Uncanny Valley from the Field[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(2): 98—100.
- [2] MACDORMAN K F, ISHIGURO H. The Uncanny Advantage of Using Androids in Cognitive and Social Science Research[J]. Interaction Studies, 2006, 7(3): 297—337.
- [3] SEYAMA J, NAGAYAMA R S. The Uncanny Valley: Effect of Realism on the Impression of Artificial Human Faces[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2007, 16(4): 337—351.
- [4] MITCHELL W J, SZERSZEN S K A, LU A S, et al. A Mismatch in the Human Realism of Face and Voice Produces an Uncanny Valley[J]. I-Perception, 2011, 2(1): 10—12.
- [5] Pütten A M, Krämer N C. How Design Characteristics of Robots Determine Evaluation and Uncanny Valley Related Responses[J]. Computers in Human Behavior, 2014, 36: 422—439.
- [6] 宗阳, 王广新. 拟人化: 人机交互中的心理学应用[J]. 心理技术与应用, 2016, 4(5): 296—305.  
ZONG Yang, WANG Guang-xin. Anthropomorphic: Human-Computer Interaction in the Psychological Application[J]. Psychological Technology and Applications, 2016, 4 (5): 296—305.
- [7] BETHEL C L, MURPHY R R. Survey of Non-Facial/Non-Verbal Affective Expressions for Appearance-Constrained Robots[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 2008, 38(1): 83—92.
- [8] MOORE R K. A Bayesian Explanation of the "Uncanny Valley" Effect and Related Psychological Phenomena[J]. Scientific Reports, 2012(2): 864.
- [9] MACDORMAN K F, CHATTOPADHYAY D. Categorization-Based Stranger Avoidance does not Explain the Uncanny Valley Effect[J].
- [10] PÜTTEN A M, SCHULTE F P, EIMLER S C, et al. Investigations on Empathy Towards Humans and Robots

- Using Fmri[J]. *Computers in Human Behavior*, 2014, 33: 201—212.
- [11] GOLDSTEIN E B. *Cognitive Psychology: Connecting Mind, Research and Everyday Experience*[J]. *Cognitive Psychology Connecting Mind Research & Everyday Experience*, 2005.
- [12] 李岩松, 周仁来. 再认记忆双加工的理论模型及研究方法[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 44: 243—246.
- LI YAN-song, ZHOU Ren-lai. Recognizing the Theoretical Model and Research Method of Memory Double Processing[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2008, 44: 243—246.
- [13] 毛新瑞, 徐慧芳, 郭春彦. 双加工再认提取中的情绪记忆增强效应[J]. *心理学报*, 2015, 47(9): 1111—1123.
- MAO Xin-rui, XU Hui-fang, GUO Chun-yan. Emotional Memory Enhancement Effect in Double Processing Recognition[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2015, 47(9): 1111—1123.
- [14] WARE C. *Visual thinking: For design*[M]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 2010.
- [15] 冯英. 汉语义类词群的语义范畴及隐喻认知研究[M]. 北京: 北京语言大学出版社, 2009.
- FENG Ying. *Semantic Category and Metaphorical Cognition of Chinese Semantic Class*[M]. Beijing Language and Culture University Press, 2009.
- [16] MACDORMAN K F, ISHIGURO H. The Uncanny Advantage of Using Androids in Cognitive and Social Science Research[J]. *Interaction Studies*, 2006, 7(3): 297—337.
- [17] 马清华. 语义的多维研究[M]. 北京: 语文出版社, 2006.
- MA Qing-hua. *Multidimensional Study of Semantics*[M]. Beijing: Language Publishing House, 2006.
- [18] 李月恩, 王震亚, 徐楠. 感性工程学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- LI Yue-en, WANG Zhen-ya, XU Nan. *Sensibility Engineering* [M]. Beijing: Ocean Press, 2009.
- [19] CHO. Lokman A M. *Innovations of Kansei Engineering*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [20] 蒋丹宁, 蔡莲红. 基于语音声学特征的情感信息识别[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 86—89.
- JIANG Dan-ning, CAI Lian-hong. Emotional Information Recognition Based on Speech Acoustic Feature[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006(1): 86—89.
- [21] 柯显信, 尚宇峰, 卢孔笔. 仿人情感交互表情机器人研究现状及关键技术[J]. *智能系统学报*, 2013, 8(6): 482—488.
- KE Xian-xin, SHANG Yu-feng, LU Kong-bi. Research Status and Key Technologies of Humanoid Interactive Facial Expression Robot[J]. *Journal of intelligent system*, 2013, 8(6): 482—488.
- [22] PIWEK L, MCKAY L S, POLLICK F E. Empirical Evaluation of the Uncanny Valley Hypothesis Fails to Confirm the Predicted Effect of Motion[J]. *Cognition*, 2014, 130(3): 271—277.
- [23] 郑立国, 罗江林, 许舸. 基于 Kinect 的动作捕捉系统的实现[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43: 249—255.
- ZHENG Li-guo, LUO Jiang-lin, XU Ge. Implementation of Motion Capture System Based on Kinect[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Science)*, 2013, 43: 249—255.
- [24] LEWKOWICZ D J, GHAZANFAR A A. The Development of the Uncanny Valley in Infants[J]. *Developmental Psychobiology*, 2012, 54(2): 124—132.