

基于眼动实验的 ASD 儿童陪伴机器人造型设计评价研究

王艳群^{1a,1b}, 杨俞玲^{1b}, 张仁杰^{1b}, 韦懿洋^{1b}, 顾天舒²

(1.江苏师范大学 a 文学院 b 工业设计中心, 江苏 徐州 221100;

2.江苏圣理工学院 中俄学院, 江苏 徐州 221100)

摘要: **目的** 通过解析 ASD 儿童视觉偏好特征, 提高陪伴机器人造型设计评价的有效性, 为设计师及教辅人员提供参考。 **方法** 首先调研整理目前市场上具有代表性的陪伴机器人造型样本, 对样本进行灰度模式处理, 制作亮度直方图; 然后结合文献分析从 30 余项眼动指标中筛选出 10 项代表性的眼动指标, 并运用眼动追踪方法展开实验, 收集整理各项眼动指标数据及视觉偏好得分; 接着通过逐步回归法筛选出 3 项对视觉偏好影响较大的眼动指标; 在此基础上建立眼动指标主因子与视觉偏好之间的回归关系, 并通过实验再次进行验证。 **结果** 通过实验发现, 基本几何形的陪伴机器人造型更为符合 ASD 儿童的视觉偏好。 **结论** 合理解析并利用 ASD 儿童陪伴机器人的视觉偏好、眼动指标及造型特征的相关性, 可为陪伴机器人造型设计研究提供理论依据。

关键词: 眼动实验; ASD 儿童; 视觉偏好; 陪伴机器人; 造型设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0121-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.013

Research on Modeling Design Evaluation of ASD Children Accompanying Robot based on Eye-Movement Experiment

WANG Yan-qun^{1a,1b}, YANG Yu-ling^{1b}, ZHANG Ren-jie^{1b}, WEI Yi-yang^{1b}, GU Tian-shu²

(1.a.Kewen College b.Industrial Design Center, Jiangsu Normal University, Jiangsu Xuzhou 221100, China;

2.China and Russia School Joint Engineering College of Jiangsu Normal University St. Petersburg National Polytechnic University, Jiangsu Xuzhou 221100, China)

ABSTRACT: By analyzing the characteristics of ASD children's visual preference, the effectiveness of modeling design evaluation of the accompanying robot can be improved, which provides a reference for designers and teaching assistants. First of all, the representative modeling samples of accompanying robots in the market were investigated and sorted out, manipulated in monochromatic processing and made into brightness histogram; Then, according to the literature analysis, 10 representative eye-movement indexes were selected from more than 30 eye-movement indexes, and the experiment was conducted with the eye-movement tracking method with collected data of eye-movement indexes and visual preference score; After that, three eye-movement indexes were selected by the stepwise regression; On this basis, the regression relationship between the main factors of eye-movement index and visual preference was established and verified by experiments. According to the experiment, it is found that the basic geometric shape of the accompanying robot is more consistent with the visual preference of ASD children. By analyzing and utilizing the correlation of visual preference, eye-movement indexes and morphological characteristics of the ASD children accompanying robot, it can provide theoretical basis for the research of the modeling design of the accompanying robot.

KEY WORDS: eye-movement test; ASD children; visual preference; accompanying robot; modeling design

收稿日期: 2022-05-24

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目资助 (19KJD460004); 教育部人文社会科学研究规划基金项目 (18YJAZH123)

作者简介: 王艳群 (1975—), 女, 副教授, 主要研究方向为儿童产品、人机交互。

通信作者: 杨俞玲 (1997—), 女, 硕士生, 主攻研究方向为儿童产品设计。

自闭症谱系障碍 (Autism Spectrum Disorders, ASD) 是一种发病于儿童早期的广泛性发育障碍, 以社会交往、沟通障碍和兴趣范围狭窄及行为重复刻板为主要特征^[1]。2019年发布的《中国自闭症教育康复行业发展状况报告III》指出, 中国的自闭症发病率达0.8%^[2]。2-6岁是干预ASD儿童的最佳时机, 越早进行干预, 自闭症的症状就能够得到越有效地缓解。如能及时发现并通过手段干预, ASD儿童社会交往能力可以实现有效改善^[3]。

1 研究背景

1.1 ASD儿童的视觉认知特点

Quill等^[4-5]研究者指出, ASD人群的视觉感知能力有较为突出的优势, 对视觉信息的理解能力和整合能力比声音信息强, 结合视觉特征进行的干预训练效果更佳。Simon Baron-Cohen^[6]通过实验研究发现, 视觉注视类型的线索更容易引起ASD儿童的关注, 并且能够产生积极的影响。樊越波^[7]在比较普通儿童与ASD儿童注视不同视觉特征组合差异的实验中, 发现其对形状和颜色的识别较为敏感。Cihak D等研究者^[8-10]认为, 视觉感知能力是ASD儿童的突出优势, 合理利用该特点, 有助于调动自闭症儿童配合训练的积极性。还有学者发现, ASD儿童对于视觉信息具有独特的注意和处理模式, 即对兴趣类物体投入持续的注意, 注视的时间延长, 次数增多^[11-13]。

通过以上相关研究可以看出, 较普通被试而言, ASD儿童对视觉信息的识别程度更高, 理解能力更强。在干预训练中, 结合ASD儿童的视觉认知特点, 积极运用色彩、轮廓、体量等造型元素, 有助于提高干预训练的有效性。

1.2 ASD儿童陪伴机器人的研究现状

早在1976年就有学者将机器人用在ASD儿童的干预训练中, Dautenhahn等^[14]于1998年开始了“南极光计划”, 在实验的过程中使用智能机器人对ASD儿童进行干预训练, 发现其社会互动能力得到了有效的提升。Kim^[15]将社交机器人、触屏电子游戏和康复训练师分别与ASD儿童进行交互实验, 结果发现, 相比于触屏电子游戏和人类治疗师的交互行为, 被试与社交机器人进行人机互动时表现出了更多的主动性行为。Shamsuddin^[16]发现陪伴机器人参与干预训练时, ASD儿童的刻板行为明显减少。Huskens等^[17]研究发现, 社交陪伴机器人有效地提升了ASD儿童与同伴及康复训练师主动性、响应性交互的能力。Warren等^[18]研究认为, ASD儿童在进行人机交互时焦虑现象得到缓解, 主动交流的能力也更容易被激发。

从相关研究可以发现, ASD儿童喜欢以机器人为载体的干预形式, 并能够配合完成互动训练; 陪伴

机器人更容易激发ASD儿童参与训练的积极性, 改善其行为刻板的现象, 是提升其认知能力的有效工具。

1.3 眼动追踪技术

眼动追踪技术是指通过眼动仪记录用户在处理视觉信息时不同的眼动轨迹特征, 进而探究用户在观察实验样本时的心理活动, 并通过眼动数据将其外显化, 能够增强研究的有效性^[19]。刘春丽^[20]以眼动追踪技术为基础, 构建视觉意象认知与设计要素之间的映射模型, 进行了学龄前儿童机器人造型设计。李洁等^[21]对机器人造型意象与视觉认知规律间的关联性进行眼动测试, 为机器人造型的优化设计提供参考。沙春发等^[22]将眼动追踪技术运用到产品的外观形态设计研究中, 从而分析产品形态与意象认知之间的关联性, 并建立了评估模型。

数据的可视化是眼动追踪技术的亮点, 主要包含瞳孔信息、注视点信息、眼跳信息、眨眼信息、位置信息和AOI(兴趣区)信息, 眼动数据可以较为直观地反映用户在观看产品时的情绪状态和心理反应^[23]。目前常见的眼动分析指标共有30余种, 包含首次注视前时间、首次注视前次数、首次注视时间、首次注视次数、持续注视时间、注视次数、瞳孔直径、瞳孔间距、注视频率、眼跳轨迹图、注视点序号等^[24]。Khalighy等^[25]通过分析用户注视产品的持续注视时间、注视次数和眼跳轨迹图, 探究影响产品美感的主要因素, 并预测用户的视觉审美偏好; 苏珂等^[26]采用SVM算法, 以注视总时间、首次注视时间、注视次数、瞳孔直径等眼动指标数据和用户打分值为基础, 建立了陶瓷产品造型评价模型。

可以看出, 不同研究者利用眼动追踪技术分析注视行为时, 往往采用不同的眼动指标来探索不同的视觉认知特点。合理地将眼动指标数据与陪伴机器人造型偏好相结合, 可以更为有效地解析ASD儿童陪伴机器人造型特征要素对儿童视觉认知特点的影响。

2 实验设计

本文提出了基于眼动追踪实验的ASD儿童陪伴机器人造型偏好评价模型, 其研究流程见图1。研究过程中首先针对ASD儿童的视觉认知特点, 运用逐步回归法, 筛选出对ASD儿童视觉偏好影响较大的眼动指标; 然后根据筛选出的眼动指标, 解析视觉偏好得分与眼动指标数据之间的映射关系。

从而削弱ASD儿童沟通交流的局限性, 为解析其视觉偏好特点提供更为清晰、客观的眼动数据支撑; 将客观眼动数据与主观调研评分相结合, 为ASD儿童陪伴机器人的造型评价研究提供了新的方法借鉴; 总结归纳ASD儿童陪伴机器人的视觉偏好、眼动指标及造型特征的相关性, 为优化陪伴机器人造型设计提供理论参考。

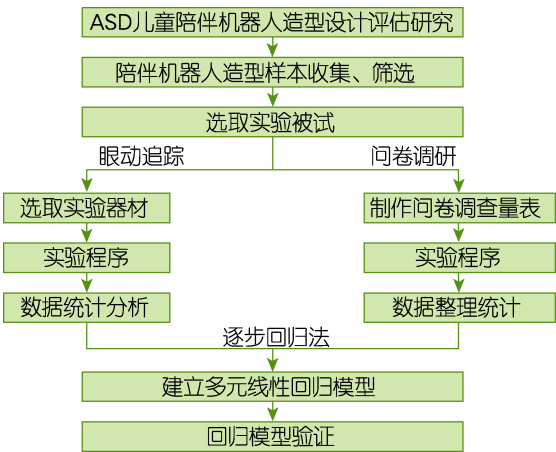


图 1 研究方法流程
Fig.1 Research method flow

2.1 陪伴机器人造型样本选取

对徐州康复中心、特殊儿童医院等相关机构进行走访调研,与教辅人员、家长进行了多次沟通,发现目前 ASD 儿童所使用的陪伴机器人就是市场上普通类型的陪伴机器人。通过儿童实体玩具店、儿童康复中心以及国内外著名的玩具品牌商城网站上收集整理销量排名较高的陪伴机器人,共收集 112 种较为典型的陪伴机器人造型,见图 2。

造型风格相似度高,特征重合较多的样本对 ASD 儿童的干扰性较强、不利于儿童在较短的时间内做出清晰的判断。陪伴机器人的销量和获奖情况可以从一定程度上反映家长和厂家的选择,销量越高,说明越

受 ASD 儿童和家长的欢迎。去除造型风格相似度高以及销量偏低的陪伴机器人造型,筛选出 48 张机器人图片,每一张图片都有不同的造型特征。参考相关研究中对儿童陪伴机器人的分类^[27-29],按照形状相似性原则可以将初步选取的样本造型大致分为基本几何形、仿生形、不规则形等 3 个大类。

为了提高实验的效率和准确度,突出机器人造型设计的创新性与典型性,邀请 2 位多年从事儿童产品设计、经验丰富的专家和 4 位产品造型设计专业的研究生,在上述基础上,进一步结合销量和获奖情况进行筛选,选取造型特征最为显著、差异性最大的机器人图片作为典型性样本。以 X1\X2\X3\X4\X5\X6 对样本进行编号,样本的主要功能、造型特征等信息见表 1。

为了更好地展现陪伴机器人造型风格特征,选择正视图、45°视角、侧视图和 135°视角的展示图进行分析,见图 3。经过多次对比发现,头部细节较多、躯干形状较为统一的机器人,如布丁豆豆、小武和悟空,正视图能够较为完整地反映产品的造型风格特征。四肢、躯干细节刻画明显,轮廓较为复杂的机器人,如可旺二代、米兔和 Robo Master S1,45°视角更能够反映产品的造型风格特征。

为了提高实验的精度,突出陪伴机器人的比例、轮廓、形状相似性等造型特征,避免材质、纹理、色彩等其他视觉因素对实验产生干扰,对陪伴机器人进行灰度模式处理,并制作亮度直方图,使各样本协调一致,确保形状线条的构成、转折圆弧的大小、整体轮廓的动态走向等造型细节清晰,见图 4。



图 2 部分陪伴机器人造型样本
Fig.2 Several modeling samples of accompanying robots

表 1 样本信息介绍表
Tab.1 Introduction table of sample information

代表性样本	名称/代号/类型	主要功能	造型特征要素	备注
	布丁豆豆/X1 基本几何形	可以模拟人类性格,给予相应的物理和情绪反馈,并具备英语教学、成长记录等功能	头部为倒角半径较大的方形显示屏,躯干轮廓为圆柱形,整体由基本几何形构成	曾获全球年度儿童智能机器人金奖、CES ASIA 2017 最佳机器人产品奖等各项奖
	小武/X2 基本几何形	具有自主拍照、主动交互功能,可以根据人体检测和语音指令,实现自主跟随、守护功能	头部近似椭圆,躯干轮廓线近似梯形,躯干中间通过颈部轮廓线的拓展与头部形成衔接	全球首款全自主智能机器人,由寒武纪智能科技有限公司研发,曾获机器人协会行业技术创新奖
	悟空/X3 仿生形	动作灵敏,表情特征识别性强,肢体动作灵活,并具备多种交互功能,如语音提示、操作手势等,可应用于家庭、社交、教育、办公等多个场景	头部细节较多,五官形态较明显,腿部较为短粗,与躯干形状较为统一,仿真程度较高	第四届世界机器人大会亮相,并获得 CES 2019 创新奖
	可旺 2 代/X4 仿生形	拥有 AI 智能编程系统的教具,具备语音、触摸交互和幼儿早教功能,能够培养儿童的逻辑思维和创造力	耳朵、尾巴等形状细节较多,四肢、躯干比例协调,动作变化通过关节屈伸体现,仿真程度较高	荣获 12 项专利技术,在多个国家发行,年销量高达 200 万
	米兔/X5 不规则形	包含 978 个零件,儿童可自由组装,DIY 不同的外形,支持手机控制和模块化图形编程,能够有效培养儿童的手眼协调能力	采用不同形状的单元组件拼接而成,四肢、躯干具有人形机器人的基本布局特征,但均表现为不规则形状	曾获 Tiliwig Awards 大奖和 Academics Choice Awards 2017 年的“Brain Toy 最强大脑奖”
	Robo Master S1 X6/不规则形	集人工智能编程、拼装、竞技于一体,在打造它的过程中,收获知识,寓教于乐	由天线、躯干和轮子等大部分件组成,下部类似车辆底盘,人形特征较弱,造型轮廓无规律	已有超过 20 万的全球用户,深受儿童和家长的喜爱



图 3 部分陪伴机器人样本多视角展示图
Fig.3 Multi-view display of some accompanying robots

2.2 实验被试

本次实验初期联系了徐州市禾润福利院的 26 名 ASD 儿童,因为实验过程较长,且实验对被试的配合度要求较高,通过多次沟通,最终确认 22 名具备正常视觉认知能力的 ASD 儿童作为实验组。详细向被试家长介绍本次实验的内容、目的和意义,征求家长同意,获得家长自愿签署的知情同意书。被试具体情况见表 2。

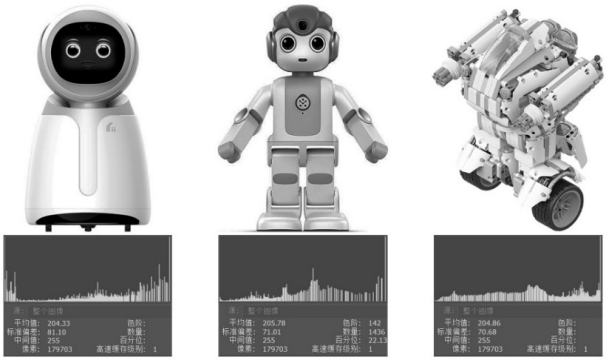


图 4 部分陪伴机器人样本及其亮度直方图
Fig.4 Some accompanying robots and their brightness histogram

表 2 研究对象基本情况
Tab.2 Basic information of research objects

年龄	人数	男性	女性
3~4 岁	9	5	4
5~6 岁	13	8	5

2.3 眼动追踪实验

2.3.1 实验材料

为确保实验结果的可靠性,将实验样本以拉丁方

设计形式排列，并且画出兴趣区域（Areas of Interest, AOI），兴趣区域编号与样本编号一致，见图 5。

2.3.2 实验设备

采用 aSee Glasses 眼镜式眼动仪、微软 Surface Pro 7 一台，分辨率为 2 650*1 600，以及附带的 aSee Glasses Studio 软件记录所有参与实验的被试观看样本的视觉行为，注视持续时间大于 100 ms 为一次注视。

2.3.3 实验程序

实验采取个别测试的方法，在独立房间内进行，房间隔音效果较好，照度大于 1000 LUX。被试者进入实验室，熟悉环境后在距离显示器约 50 cm 的地方坐下；实验开始之前，检查实验环境，以免出现陌生的视觉目标，吸引被试的注意力。然后由教辅人员向被试讲解实验程序，并提前在日常学习中出示样本，以确保被试能够熟悉实验流程及样本造型。实验时，邀请被试家长或教辅人员进行辅助，处理可能出现的

行为问题。为了确保实验能够准确进行，每次实验前进行 3 点校准法，校准成功后方能进行实验。实验结束后给予被试一定的物质奖励。

2.3.4 眼动指标选取

不同的眼动指标可以反映被试不同的视觉认知特点，为了更加清晰准确地解析被试对不同陪伴机器人造型特征的视觉注视行为，在 30 余种眼动指标中筛选出 10 种应用率较高的进行实验^[30]。分别是首次注视前时间（Time to First Fixation, TFF）、首次注视前次数（Fixation Before, FB）、首次注视时间（First Fixation Duration, FFD）、持续注视时间（Fixation Duration, FD）、注视次数（Fixations Count, FC）、回视时间（Regression Time, RT）、回视次数（Regression in Count, RC）、注视时间比（Proportion of Fixation Duration, PFD）、回看时间比（Regression Time Rate, RTR）、再注视比率（Regaze Ratio, RR），各眼动指标的具体含义见表 3。

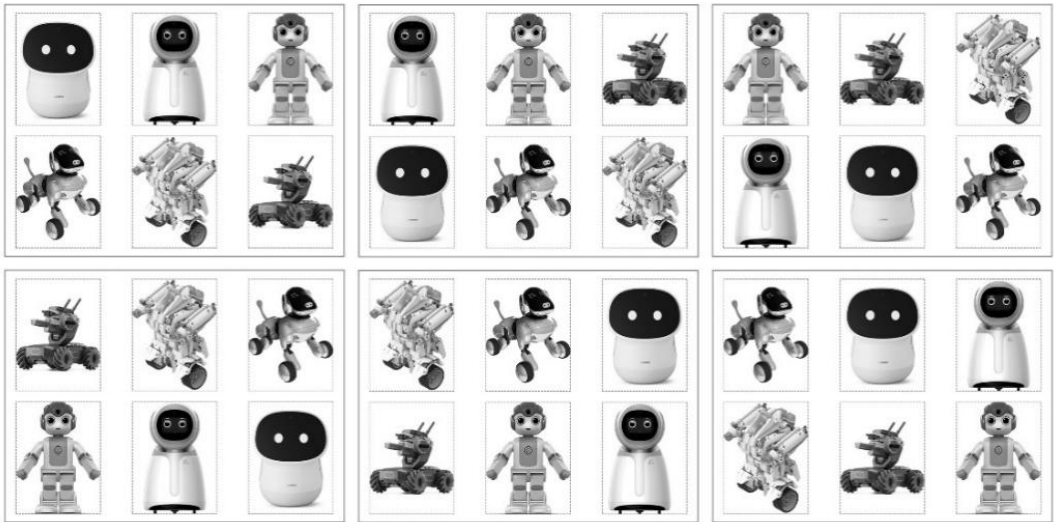


图 5 实验样本
Fig.5 Experimental samples

表 3 眼动指标及其含义
Tab.3 Eye-movement index and its implication

指标	含义
首次注视前时间（TFF）	从观看样本开始到视线第一次注视到兴趣区的时长，首次注视前时间越短，表明该兴趣区越容易被注意到，越容易引起关注。
首次注视前次数（FB）	视线第一次落入兴趣区之前所有注视点的总个数，注视点过多表明该兴趣区不容易被注意到，吸引力较弱。
首次注视时间（FFD）	落入兴趣区内第 1 个注视点的持续时间，首次注视时间越长，表明被试对该兴趣区的关注程度越高。
持续注视时间（FD）	视线在兴趣区内所有注视点的注视时间总和，主要反映信息加工的偏向，持续注视时间越长，表明该兴趣区对被试的吸引力越高。
注视次数（FC）	一次注视为一个注视点，注视次数是在兴趣区内注视点的总数量，注视次数越少，表明该兴趣区对被试的吸引力越弱。

续表 3

指标	含义
回视时间 (RT)	离开兴趣区后, 又从其他区域返回到该兴趣区的所有注视点持续时间之和, 回视时间越长, 表明该兴趣区对被试的吸引力越高。
回视次数 (RC)	注视点离开某兴趣区后, 又从其他区域重新返回到该兴趣区的次数, 回视次数越多, 表明该兴趣区越容易引起被试关注。
注视时间比 (PFD)	$PFD=Ts/Tf$ (兴趣区注视时间/总注视时间), 注视时间比越高, 表明被试对该兴趣区的注视时间越长, 兴趣越高。
回看时间比 (RTR)	$RTR=Tr/Tf$ (兴趣区累计回看时间/总注视时间), 回看时间比越低, 表明对该兴趣区的关注程度越低。
再注视比率 (RR)	$RR=Nr/Nf$ (兴趣区回看次数/总注视次数), 再注视比率越高, 表明对该兴趣区的回看次数越多, 关注度越高。

2.3.5 实验结果

通过 aSee Glasses 眼镜式眼动仪配套的 Studio 1.1.17.8 分析软件将眼动数据导出, 利用 SPSS 22.0 进行数据的统计与分析, 实验数据见表 4。

表 4 眼动实验数据
Tab.4 Experimental data of eye-movement

	TFF	FB	FFD	FD	FC	RT	RC	PFD	RTR	RR
X1	0.02	2.34	0.32	1.58	8.06	1.26	7.06	0.34	0.27	0.26
X2	0.03	3.23	0.37	1.68	9.32	1.31	8.32	0.35	0.27	0.29
X3	0.03	4.17	0.24	1.26	7.41	1.02	6.41	0.26	0.21	0.23
X4	0.07	8.48	0.17	0.97	5.68	0.79	4.68	0.20	0.17	0.16
X5	0.11	13.08	0.15	0.72	4.71	0.57	3.71	0.15	0.12	0.13
X6	0.07	7.98	0.19	0.90	5.76	0.70	4.76	0.19	0.15	0.17

2.4 ASD 儿童陪伴机器人造型设计偏好统计

根据美国心理学家 Osgood 创立的语义分化法, 并结合李克特量表 (Likert scale) 编制评估问卷, 问卷中的评估量表分为 5 个等级^[31]。由于 ASD 儿童语言表达能力较弱, 根据其视觉认知特点绘制视觉评分图表辅助评分^[32-33], 分别以 1~5 的分值作为被试对陪伴机器人造型的评分标准, 可以反映被试对不同机器人造型的视觉偏好, 见图 6。

实验开始前由教辅人员对被试详细讲解实验流程和要求, 并介绍视觉评分图表中每个评分等级的含义, 确保被试理解实验要求和评分图表的使用方式。实验时, 让被试儿童自己观察实验样本, 并分别对 6 个实验样本根据喜爱程度进行相应的评分, 即根据偏好程度在视觉评分图表中相应的位置勾选, 见图 7。



图 6 视觉评分
Fig.6 Visual scoring chart



图 7 实验场景图
Fig.7 Experimental scene diagram

实验后，由教辅人员记录整理不同造型机器人对应的评分等级被选择的次数，统计得出陪伴机器人造型的最终评分数据（见图 8），评分越高说明儿童兴趣越大，评分越低说明儿童兴趣越小。

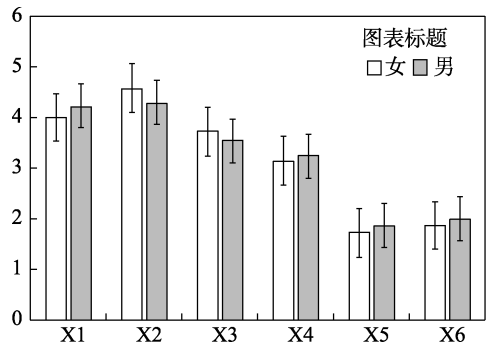


图 8 样本评价得分
Fig.8 Parametric map of sample scoring

3 建立回归模型

多元线性回归模型是统计分析方法中最常用的一种方法，用来确定两种或两种以上的影响因素之间的关系，并建立因变量与自变量（影响因素）之间的线性函数关系式，其模型的一般形式如下：

$$\hat{y} = \hat{\sigma}_0 + \hat{\sigma}_1x_1 + \hat{\sigma}_2x_2 \cdots \hat{\sigma}_nx_n \tag{1}$$

其中 y 为视觉偏好评价得分， $x_1 \sim x_n$ 代表自变量，即眼动指标， n 为解释变量的数目， σ_0 为常量，是当自变量都为 0 时 y 的期望值， $\sigma_j (j = 1, 2, \cdots, n)$ 为回归系数。相比常规的问卷调查评分的视觉偏好分析，采用的是较为成熟的逐步回归分析方法，并将客观眼动

实验数据与主观视觉偏好调研相结合，可以为设计评价提供更为清晰、全面的数据支撑。

3.1 可信度检验

通过 SPSS 软件的“可靠性分析”功能对眼动实验数据和样本的视觉偏好评价得分进行可信度检验，整体样本的克伦巴赫系数 α 系数为 0.802，说明本次实验数据的同质性相对很高，根据 α 系数的评价表属于理想层次，见表 5。

表 5 信度分析
Tab.5 Reliability analysis

		观察值处理摘要		可靠性统计	
		N	%	Cronbach Alpha	项数
观察值	有效	540	100.0	0.802	11
	已排除 ^a	0	0.0		
	总计	540	100.0		

对表 4 中的眼动数据进行统计分析，根据被试间的平方和、项目之间的平方和，进行方差分析，结果显示 $p < 0.05$ ，即实验数据的重复标度效果良好，见表 6。

3.2 变量的共同度检验

为了确定眼动指标与陪伴机器人造型样本在数据上的关联程度，进行变量的共同度检验，共同性列表如表 7 所示。除首次注视时间之外，其他眼动指标的共同度都达到 0.85 以上，且共同度在 0.9 以上的占 60%，因此可以确定眼动追踪实验与偏好统计实验的结果效度较高。

表 6 方差分析
Tab.6 Variance analysis

		平方和	自由度	均方	F	显著性
人员之间		3044.772	539	5.649	758.913	0.000
项目之间		41378.112	10	4137.811		
人员中	残差	29387.814	5390	5.452		
	总计	70765.926	5400	13.105		
总计		73810.697	5939	12.428		

表 7 共同度检验
Tab.7 Common degree test

眼动指标	起始	提取	眼动指标	起始	提取
持续注视时间	1.00	0.951	首次注视前次数	1.00	0.972
首次注视时间	1.00	0.657	回看次数	1.00	0.910
首次注视前时间	1.00	0.972	回看时间比	1.00	0.863
回看时间	1.00	0.873	再注视比率	1.00	0.872
注视次数	1.00	0.910	注视时间比	1.00	0.913

3.3 回归分析

逐步回归法是将全部自变量由大到小地逐个引入回归方程,按照其贡献度大小剔除作用不显著的变量,进而建立最优的回归模型,以便于深入研究变量之间的依赖关系^[34-35]。在可靠性分析和共同度检验的基础上,采用逐步回归法对实验数据进行相关性计算,提炼出 3 项指标:注视时间比、首次注视前时间和注视次数。以这 3 项指标作为自变量,建立视觉偏好的多元线性回归方程。从表 8 可以看出,该模型的复相关系数即拟合度 R 值为 0.563,样本决定系数 R^2 为 0.317,调整后 R^2 的值为 0.313, Durbin-Watson 检验值为 1.555,说明该回归模型选定的眼动指标可以较大程度上解释偏好统计得分,且残差与自变量相互独立。

表 8 模型摘要
Tab.8 Model summary

模型	R	R^2	调整后 R^2	标准预估 的误差	Durbin- Watson
1	0.480	0.230	0.229	1.040	
2	0.535	0.286	0.283	1.003	1.555
3	0.563	0.317	0.313	0.982	

注:因变量:偏好统计得分

从表 9 中可以得出,回归模型所对应的 F 值为 82.958,显著性 $\rho = 0.000 < 0.05$,证明该模型有效。

表 9 离散系数
Tab.9 Dispersion coefficient

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
3 回归	239.909	3	79.970	82.958	0.000
残差	516.691	536	0.964		
统计	756.600	539			

从表 10 中可以得出,注视时间比、首次注视前时间和注视次数的回归系数分别为 2.439, -5.478 和 0.088,且这 3 个变量所对应的显著性均小于 0.05,可整理得到回归方程:

$$y = 1.990 + 2.439x_1 - 5.478x_2 + 0.088x_3 \quad (2)$$

从回归方程(2)中的回归系数绝对值大小可以看出,首次注视前时间 $x_2 >$ 注视时间比 $x_1 >$ 注视次数 x_3 ,即对视觉偏好影响程度最大的是首次注视前时间,影响程度最小的是注视次数。

3.4 模型验证

为了进一步验证回归模型的有效性,选取徐州五彩鹿儿童发展中心的 12 名 ASD 儿童对 6 个机器人造型样本进行眼动追踪和偏好统计实验,注视时间比、首次注视前时间和注视次数的眼动实验数据,见表 11。

表 10 回归系数
Tab.10 Regression coefficient

模型		非标准化系数		标准化系数	t	显著性
		B	标准误差	Beta		
3	常量	1.990	0.147		13.554	0.000
	注视时间比	2.439	0.438	0.255	5.574	0.000
	首次注视前时间	-5.478	0.874	-0.248	-6.269	0.000
	注视次数	0.088	0.018	0.214	4.956	0.000

注:因变量:偏好统计得分

表 11 眼动实验数据
Tab.11 Experimental data of eye-movement

	X1			X2			X3			X4			X5			X6		
	PFD	TFF	FC	PFD	TFF	FC	PFD	TFF	FC	PFD	TFF	FC	PFD	TFF	FC	PFD	TFF	FC
1	0.35	0.10	15	0.40	0	12	0.37	0.17	10	0.21	0.07	9	0.11	0.18	5	0.17	0.13	5
2	0.47	0.01	7	0.38	0.04	14	0.27	0	5	0.13	0.09	7	0.22	0.19	4	0.20	0.12	4
3	0.33	0	11	0.43	0.01	8	0.35	0	12	0.24	0.10	10	0.19	0.16	7	0.19	0.06	7
4	0.51	0.04	9	0.37	0	10	0.29	0.07	6	0.11	0.13	9	0.17	0.23	3	0.22	0.05	9
5	0.33	0.07	8	0.47	0.11	13	0.37	0	11	0.14	0.11	7	0.20	0.17	5	0.33	0.05	6
6	0.41	0.04	13	0.44	0	17	0.18	0.15	8	0.12	0.14	6	0.19	0.17	8	0.22	0	7
7	0.46	0.13	14	0.42	0	13	0.25	0.13	9	0.10	0.10	11	0.13	0.15	4	0.18	0.05	6
8	0.28	0	9	0.52	0.01	10	0.07	0.2	11	0.27	0.13	9	0.29	0.18	6	0.16	0.13	6
9	0.17	0.11	9	0.43	0.01	14	0.17	0	7	0.31	0.06	6	0.34	0.18	2	0.15	0.14	7
10	0.28	0.05	6	0.35	0	16	0.27	0.17	8	0.28	0	5	0.09	0.23	6	0.13	0.17	6
11	0.31	0.07	14	0.41	0	13	0.36	0.11	9	0.19	0.03	8	0.17	0.22	5	0.11	0	4
12	0.24	0.06	7	0.60	0	16	0.11	0.06	10	0.22	0	7	0.06	0.18	8	0.24	0.12	7

根据回归方程(2)计算得到相应的模型评价计算分值,见表12。

表 12 实验数据
Tab.12 Experimental data

样本代号	X1	X2	X3	X4	X5	X6
模型评价计算分值	3.42	4.12	2.91	2.71	1.88	2.54
偏好得分	3.6	4	3	2.75	1.78	2.625

将模型评价计算分值与偏好统计得分相对比,对比情况见图9。可以看出,回归模型评价计算得出的分值与偏好统计得分值曲线基本相拟合,证明该回归模型的可靠性较高,故认定模型有效。

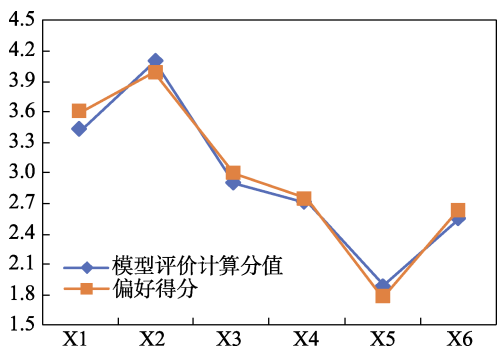


图9 儿童陪伴机器人造型评价分值
Fig.9 Evaluation of broken line drawings for children accompanying robot

3.5 综合分析

通过问卷调研,可以统计得到陪伴机器人造型样本中偏好得分情况分别是: $X2>X1>X3>X4>X6>X5$,即基本几何形>仿生形>不规则形。在此基础上,结合眼动实验数据分析,可以得到视觉偏好的多元线性回归模型,提炼出对被试视觉偏好得分影响较大的3项眼动指标:首次注视前时间、注视时间比和注视次数。

通过对比眼动实验数据和陪伴机器人造型特征可知,评分较高的样本外形轮廓大都包含较为简洁的几何形状,例如头部与躯干之间通过流畅的线条进行衔接,四肢细节刻画较少。该类样本造型更容易获得被试的首次注视,并具有较长的持续注视时间和较高的注视次数。

评分稍低的样本细节刻画较多,头部、四肢及躯干的轮廓比例具有较高的仿生特点,例如头部具有较为明显的人类或者动物特点,面部五官刻画较为清晰。相比于具有几何形状特征的样本,该类样本视觉冲击力较弱,但持续注视时间相对较长,注视次数相对较多。

评分最低的样本轮廓大都较为复杂,四肢、躯干往往由不同类型的形状单元拼接而成,组件之间形状协调性较弱,例如躯干及上肢为仿生形状,下肢为车辆底盘造型。该类样本造型具有较长的首次注视前时

间,持续注视时间较少。

ASD 儿童陪伴机器人造型设计是以调动儿童参与干预训练的积极性、提高干预效率为主要目标,在设计中可以优先考虑眼动指标中具有首次注视前时间较短、持续注视时间较长、注视次数较多特征的造型。

3.6 结论

通过研究可以发现:从目前研究常用的10个眼动指标中筛选出3个与视觉偏好关联性较大的指标,即首次注视前时间、注视时间比、注视次数;对视觉偏好影响程度大小的排序为首次注视前时间 $x_2>$ 注视时间比 $x_1>$ 注视次数 x_3 ,即研究视觉偏好的眼动实验中,应优先观察这3项指标的数据;形状轮廓中基本几何形较为明显、组件风格较为协调、细节刻画适量的造型,更符合 ASD 儿童的视觉偏好。

4 结语

本研究通过采用眼动追踪技术和问卷调研对 ASD 儿童陪伴机器人造型设计进行评价,将客观眼动实验数据与主观视觉偏好调研相结合,以期降低设计评价过程中主观因素的干扰,获得更为客观的用户偏好分析,使用户对产品的体验更加准确客观。首先通过眼动实验获取各项指标数据,在可靠性分析和共同度检验合理的基础上,利用逐步回归法筛选出3个眼动指标主因子,建立眼动指标与视觉偏好之间的回归关系,即得到视觉偏好与眼动指标的相关性。然后结合偏好评分对实验样本的造型特征进行分析,提炼出视觉偏好与造型特征的相关性。在此基础上总结归纳了 ASD 儿童陪伴机器人的视觉偏好、眼动指标及造型特征的相关性,为陪伴机器人造型设计研究提供理论依据,也为教辅人员的使用提供参考。以期促进 ASD 儿童更为积极主动的人机交互行为,提高其干预训练的有效性。

此外,由于陪伴机器人造型图片在空间感、材质和色彩的表现等细节上存在局限性,在后续的研究中将采用陪伴机器人实物作为测试样本,以期获得更为全面的结果反馈,为 ASD 儿童陪伴机器人造型设计提供更为细致的设计参考。

参考文献:

- [1] JOSHI G, FARAONE S V, WOZNIAK J, et al. Examining the Clinical Correlates of Autism Spectrum Disorder in Youth by Ascertainment Source[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2014, 44(9): 2117-2126.
 - [2] 五彩鹿儿童行为矫正中心. 中国自闭症儿童的发展与现状报告: 中国自闭症教育康复行业发展状况报告Ⅲ[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2019: 28-31.
- Colorful Deer Children Behavior Correction Center. Report

- on the Development and Current Situation of Autistic Children in China: Report on the Development of Autistic Education and Rehabilitation Industry in China III[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing House, 2019: 28-31.
- [3] 杨晓玲, 蔡逸周, 臧玉峰, 等. 解密孤独症[M]. 北京: 华夏出版社, 2007: 111-134.
YANG Xiao-ling, CAI Yi-zhou, ZANG Yu-feng, et al. Taking the Mystery Out of Autism[M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 2007: 111-134.
- [4] QUILL K, GURRY S, LARKIN A. Daily Life Therapy: A Japanese Model for Educating Children with Autism[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 1989, 19(4): 625-635.
- [5] DAUTENHAHN K, WERRY I, SALTER T, et al. Towards Adaptive Autonomous Robots in Autism Therapy: Varieties of Interactions[C]// Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Computational Intelligence in Robotics and Automation for the New Millennium (Cat. No.03EX694). Kobe: IEEE, 2003: 577-582.
- [6] BARON-COHEN S. Autism, Maths, and Sex: The Special Triangle[J]. The Lancet Psychiatry, 2015, 2(9): 790-791.
- [7] 樊越波, 彭晓玲, 黄丹. 自闭症患者视觉信息加工的超常能力概述及其机制研究进展[J]. 中国康复, 2015, 30(1): 53-57.
FAN Yue-bo, PENG Xiao-ling, HUANG Dan. Overview of the Supernormal Ability of Autistic Patients' Visual Information Processing and Its Mechanism Research Progress[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2015, 30(1): 53-57.
- [8] CHARLOP-CHRISTY M H, CARPENTER M, LE L, et al. Using the Picture Exchange Communication System (PECS) with Children with Autism: Assessment of PECS Acquisition, Speech, Social-Communicative Behavior, and Problem Behavior[J]. Journal of Applied Behavior Analysis, 2002, 35(3): 213-231.
- [9] SHARP D L M, BRANSFORD J D, GOLDMAN S R, et al. Dynamic Visual Support for Story Comprehension and Mental Model Building by Young, At-Risk Children[J]. Educational Technology Research and Development, 1995, 43(4): 25-42.
- [10] CIHAK D, FAHRENKROG C, AYRES K M, et al. The Use of Video Modeling via a Video iPod and a System of Least Prompts to Improve Transitional Behaviors for Students with Autism Spectrum Disorders in the General Education Classroom[J]. Journal of Positive Behavior Interventions, 2010, 12(2): 103-115.
- [11] SASSON N J, ELISON J T, TURNER-BROWN L M, et al. Brief Report: Circumscribed Attention in Young Children with Autism[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2011, 41(2): 242-247.
- [12] 王广帅, 陈靓影, 张坤. 基于多重因素混合设计和眼动追踪的自闭症谱系障碍儿童情绪面孔识别[J]. 科学通报, 2018, 63(31): 3204-3216.
WANG Guang-shuai, CHEN Ying-chen, ZHANG Kun. The Perception of Emotional Facial Expressions by Children with Autism Using Hybrid Multiple Factorial Design and Eye-Tracking[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(31): 3204-3216.
- [13] ASHWIN E, HIETANEN J K, BARON-COHEN S. Atypical Integration of Social Cues for Orienting to Gaze Direction in Adults with Autism[J]. Molecular Autism, 2015, 6(1): 5.
- [14] DAUTENHAHN K, WERRY I. A quantitative technique for analysing robot-human interactions[C]// Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on. Lausanne: IEEE, 2002: 1132-1138.
- [15] KIM E S, BERKOVITS L D, BERNIER E P, et al. Social Robots as Embedded Reinforcers of Social Behavior in Children with Autism[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2013, 43(5): 1038-1049.
- [16] SHAMSUDDIN S, YUSSOF H, FA HANAPIAH, et al. Response of Children With Autism to Robotic Intervention and Association with IQ Levels[C]// 4th International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics. Genoa: IEEE, 2014, 8: 116-118.
- [17] HUSKENS B, PALMEN A, VAN DER WERFF M, et al. Improving Collaborative Play between Children with Autism Spectrum Disorders and Their Siblings: The Effectiveness of a Robot-Mediated Intervention Based on Lego® Therapy[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2015, 45(11): 3746-3755.
- [18] WARREN Z, ZHENG Zhi, DAS S, et al. Brief Report: Development of a Robotic Intervention Platform for Young Children with ASD[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2015, 45(12): 3870-3876.
- [19] HUDDLESTON P T, BEHE B K, DRIESENER C, et al. Inside-Outside: Using Eye-Tracking to Investigate Search-Choice Processes in the Retail Environment[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2018, 43: 85-93.
- [20] 刘春丽, 王爱红. 基于眼动实验的学龄前儿童机器人设计[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 210-216.
LIU Chun-li, WANG Ai-hong. Design of Preschooler Robot Based on eye-movement Test[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(24): 210-216.
- [21] 李洁, 郭士杰. 人形机器人造型意象与用户情感认知研究[J]. 机械设计, 2019, 36(5): 134-138.
LI Jie, GUO Shi-jie. Research on Image Modeling Design and User Emotional Cognition of Humanoid Robot[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(5): 134-138.
- [22] 沙春发, 潘欣云, 杨桦, 等. 基于眼动实验的产品造型与意象空间匹配度评估指标选取[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 105-111.
SHA Chun-fa, PAN Xin-yun, YANG Hua, et al. Cognition Index Selection for Evaluating Matching Degree between Product Shapes and Image Space Based on Eye-Tracking Experiment[J]. Science Technology and

- Engineering, 2019, 19(32): 105-111.
- [23] 李淑江, 孔鹏宇, 窦如宏, 等. 游艇关键造型特征的眼动追踪研究[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 91-97.
LI Shu-jiang, KONG Peng-yu, DOU Ru-hong, et al. Eye Tracking on Key Modeling Features of Yachts[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 91-97.
- [24] 闫国利, 白学军. 眼动研究心理学导论揭开心灵之窗奥秘的神奇科学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
YAN Guo-li, BAI Xue-jun. General Introduction to the Eye-movement Research[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [25] KHALIGHY S, GREEN G, SCHEEPERS C, et al. Quantifying the Qualities of Aesthetics in Product Design Using Eye-Tracking Technology[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 49: 31-43.
- [26] 苏珂, 李德平, 魏高峰. 基于眼动追踪的陶瓷产品造型设计评价方法[J]. 包装工程, 2021, 42(2): 51-56.
SU Ke, LI De-ping, WEI Gao-feng. Ceramic Product Modeling Design Evaluation Method Based on Eye Tracking[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 51-56.
- [27] 陈国强, 姜楠, 张鹏, 等. 基于感性工学的儿童陪伴机器人造型设计[J]. 包装工程, 2021, 42(4): 166-171.
CHEN Guo-qiang, JIANG Nan, ZHANG Peng, et al. Modeling of Children's Companion RoBot Based on Perceptual Engineering[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(4): 166-171.
- [28] 许小侠, 王晨亮. 不同类型儿童陪伴机器人的造型设计与情感化设计浅析[J]. 工业设计, 2019(10): 58-59.
XU Xiao-xia, WANG Chen-liang. Analysis on the Model Design and Emotional Design of Different Types of Children's Accompanying Robots[J]. Industrial Design, 2019(10): 58-59.
- [29] 王永固, 黄碧玉, 李晓娟, 等. 自闭症儿童社交机器人干预研究述评与展望[J]. 中国特殊教育, 2018(1): 32-38.
WANG Yong-gu, HUANG Bi-yu, LI Xiao-juan, et al. A Review and Prospect of Intervention on Autistic Children by Social Robots[J]. Chinese Journal of Special Education, 2018(1): 32-38.
- [30] 郑玉玮, 王亚兰, 崔磊. 眼动追踪技术在多媒体学习中的应用: 2005—2015年相关研究的综述[J]. 电化教育研究, 2016, 37(4): 68-76.
ZHENG Yu-wei, WANG Ya-lan, CUI Lei. The Application of Eye Tracking Technology in Multimedia Learning: A Review of Research from 2005 to 2015[J]. e-Education research, 2016, 37(4): 68-76.
- [31] WONG C, ODOM S L, HUME K A, et al. Evidence-Based Practices for Children, Youth, and Young Adults with Autism Spectrum Disorder: A Comprehensive Review[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2015, 45(7): 1951-1966.
- [32] 刘洋, 冯建新. 家长敏感性行为在自闭症谱系障碍儿童语言干预中的作用[J]. 中国特殊教育, 2018(12): 42-48.
LIU Yang, FENG Jian-xin. The Role of Parents' Sensitive Behavior in the Language Interventions in Children with Autism Spectrum Disorders[J]. Chinese Journal of Special Education, 2018(12): 42-48.
- [33] 张丙辰, 王艳群, 杨俞玲, 等. 基于视觉提示的ASD儿童绘本角色造型设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(22): 244-250.
ZHANG Bing-chen, WANG Yan-qun, YANG Yu-ling, et al. Role Modeling Design of ASD Children's Picture Books Based on Visual Tips[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(22): 244-250.
- [34] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. 统计与决策, 2017(14): 31-35.
YOU Shi-bing, YAN Yan. Stepwise Regression Analysis and Its Application[J]. Statistics & Decision, 2017(14): 31-35.
- [35] 王平, 徐加利, 闫保罗, 等. 基于主成分-聚类-逐步回归分析的夏玉米品种光温利用能力综合评价[J]. 山东农业科学, 2020, 52(10): 71-77.
WANG Ping, XU Jia-li, YAN Bao-luo, et al. Comprehensive Evaluation on Light and Temperature Utilization Ability of Different Summer Maize Varieties Based on Principal Component, Cluster and Stepwise Regression Analyses[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(10): 71-77.

责任编辑: 陈作