

不同意图场景眼动注视模式机器学习算法 识别孤独症谱系障碍的研究

程蓉^{1,2,3} 赵众³ 侯文文^{1,2} 周刚³ 廖昊天³ 张雪³ 李晶^{1,2}

(1. 中国科学院心理研究所/中国科学院行为科学重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学心理学系, 北京 100049; 3. 深圳大学机电与控制工程学院, 广东深圳 518010)

[摘要] **目的** 旨在探究孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD) 和正常发育 (typically developing, TD) 儿童在观看不同意图场景视频时的视觉感知差异, 并通过机器学习算法, 探索客观区分 ASD 和 TD 儿童的可行性。**方法** 共纳入 58 名 ASD 儿童和 50 名 TD 儿童, 观看包含联合意图和非联合意图的视频, 使用儿童观看视频时在不同注视兴趣区的注视时长占比和注视次数占比作为原始特征指标, 输入到分类器中构建分类模型, 分析比较不同分类模型的分类准确率、灵敏度和特异度等指标。**结果** 使用支持向量机、线性判别算法、决策树、随机森林和邻近算法 (K=1、3、5、7) 8 种常见的分类器基于原始特征指标进行分类时, 最高分类精度为 81.90%。为进一步提高分类精度, 采用特征重构方式, 运用决策树分类器进行分类, 分类模型的准确度高达 91.43%, 特异度为 89.80%, 灵敏度为 92.86%, 受试者操作特征曲线的曲线下面积为 0.909 ($P<0.001$)。**结论** 采用眼动追踪数据构建的机器学习模型可精确地将 ASD 儿童与 TD 儿童区分开来, 为开发快速客观筛查 ASD 的辅助工具提供科学依据。
[中国当代儿科杂志, 2024, 26 (2): 151-157]

[关键词] 孤独症谱系障碍; 机器学习; 联合意图; 动作理解; 眼动追踪; 儿童

Machine learning algorithms for identifying autism spectrum disorder through eye-tracking in different intention videos

CHENG Rong, ZHAO Zhong, HOU Wen-Wen, ZHOU Gang, LIAO Hao-Tian, ZHANG Xue, LI Jing. CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology/Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China (Li J, Email: lij@psych.ac.cn)

Abstract: Objective To investigate the differences in visual perception between children with autism spectrum disorder (ASD) and typically developing (TD) children when watching different intention videos, and to explore the feasibility of machine learning algorithms in objectively distinguishing between ASD children and TD children. **Methods** A total of 58 children with ASD and 50 TD children were enrolled and were asked to watch the videos containing joint intention and non-joint intention, and the gaze duration and frequency in different areas of interest were used as original indicators to construct classifier-based models. The models were evaluated in terms of the indicators such as accuracy, sensitivity, and specificity. **Results** When using eight common classifiers, including support vector machine, linear discriminant analysis, decision tree, random forest, and K-nearest neighbors (with K values of 1, 3, 5, and 7), based on the original feature indicators, the highest classification accuracy achieved was 81.90%. A feature reconstruction approach with a decision tree classifier was used to further improve the accuracy of classification, and then the model showed the accuracy of 91.43%, the specificity of 89.80%, and the sensitivity of 92.86%, with an area under the receiver operating characteristic curve of 0.909 ($P<0.001$). **Conclusions** The machine learning model based on eye-tracking data can accurately distinguish ASD children from TD children, which provides a scientific basis for developing rapid and objective ASD screening tools.
[Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2024, 26(2): 151-157]

[收稿日期] 2023-09-14; [接受日期] 2023-12-25

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目 (31971009; 82171539); 中国科学院青年创新促进会项目 (2021082)。

[作者简介] 程蓉, 女, 教授, 博士。

[通信作者] 李晶, 女, 副研究员。Email: lij@psych.ac.cn。

Key words: Autism spectrum disorder; Machine learning; Joint intention; Action understanding; Eye tracking; Child

孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD) 是一种严重的神经发育障碍, 其核心症状为社会互动与交流的缺损, 以及重复的、局限的行为或兴趣^[1-3]。ASD 多起病于幼儿期, 早期干预治疗能够有效改善预后, 降低患儿成年期的疾病负担^[4]。目前, ASD 诊断主要依赖外在的行为学观察与评估人员的主观经验判断, 由于缺乏相对客观的标准用于 ASD 的诊断和评估, 导致了较高水平的漏诊和误诊风险^[5-7]。因此, 如何利用现代技术提高 ASD 早期诊断的客观性和准确性, 开发快速筛查的辅助诊断方法, 提高诊断效率, 成了一个迫切需要解决的问题。

在日常生活中, 涉及大量人际合作行为, 如共同抬一张桌子、共同搭积木等。在这些合作行动中, 相互协调依赖于对合作意愿的表达、对他人行动的预测, 以及相应的个体行为的执行能力^[8-9]。大量研究显示, 12 月龄左右的婴儿已经具备判断他人意图、预测他人行为及参与互动的能力^[9-13]; 14 月龄的婴儿可以理解合作场景和共同目标^[14]; 2 岁左右的儿童即便置身于尚未接触的游戏环境, 亦能迅速掌握与同伴互动的技巧, 与他人协作完成一系列简单任务^[15]。

由于 ASD 儿童共同意愿不足, 表现出非典型的合作行为^[8, 16-17]。Fitzpatrick 等^[16]发现 ASD 儿童在互动过程中难以完成大小和节奏一致的动作。ASD 儿童的社会和非社会性缺陷对完成不同类型的合作任务影响程度不同^[18-20]。Liebal 等^[21]对 ASD 儿童参与合作行为的意愿程度进行研究, 发现 ASD 症状越强, 越难理解合作游戏的目的。

注视模式是衡量联合意图 (joint intention, JI) 能力的重要行为指标之一。ASD 儿童对人脸的不典型注视行为已被研究证实^[22]。Frazier 等^[18]通过对 ASD 患者观看社会性/非社会性信息的眼动追踪研究进行荟萃分析, 发现随着 ASD 患者年龄增长, 在社交互动过程中, 异常注视会加剧。然而上述研究^[18, 22]鲜有涉及比较 JI 和非联合意图 (non-joint intention, NJI) 两种模式下 ASD 儿童的注视模式。

眼动追踪技术因具有非侵入、无接触地捕捉人眼注视行为指标的优点而被广泛应用于研究 ASD 儿童的社交注视模式^[23-25]。眼动技术与自由观看范式结合, 可以测量被试对复杂社会情境的

自发反应^[24-28]。近年来, 机器学习 (machine learning, ML) 逐渐被应用于基于眼动追踪数据的 ASD 诊断、分型、鉴别等方面^[29-33]。

鉴于以上分析, 本研究拟采用包含 JI 和 NJI 的社交视频作为试验刺激材料^[13], 探讨 ASD 儿童在观看不同类型社交视频时的眼动注视模式, 通过对眼动数据的特征提取, 运用 ML 算法进行分类, 并根据分类模型的准确性和可靠性进行综合评价, 以期构建一种能够客观区分 ASD 的模型, 为辅助诊断提供科学指导。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究共从北京、青岛、广州和深圳等专业机构招募了 58 名 ASD 儿童, 所有参与儿童均符合《精神障碍诊断与统计手册 (第 5 版)》中 ASD 诊断标准^[34], 由专业的儿童精神科医生确诊。选择 50 名来自北京一所幼儿园的正常发育 (typically developing, TD) 儿童为对照。两组儿童性别、年龄比较差异无统计学意义 ($P>0.05$)。采用瑞文标准推理测验^[35]对 ASD 组和 TD 组儿童的智力年龄进行匹配。在研究开展前, 已获得儿童父母的书面知情同意, 并获得儿童的口头同意。本研究经中国科学院心理学研究所伦理委员会批准 (H19053)。

表 1 ASD 组和 TD 组的人口统计学信息比较

组别	例数	性别 (男/女, 例)	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)
TD 组	50	41/9	6.1 $\pm$ 1.1
ASD 组	58	48/10	6.1 $\pm$ 1.0
χ^2/t 值		-0.011	-0.061
P 值		0.918	0.952

注: [ASD] 孤独症谱系障碍; [TD] 正常发育。

1.2 研究方法

本研究采用 Fawcett 研究范式^[13], 被试观看一系列视频, 并回答问题。视频分为 3 个阶段: 引入阶段 (播放 1 次)、演示阶段 (播放 3 次) 和测试阶段 (播放 3 次)。引入阶段和演示阶段的视频分为 NJI 和 JI 两种社交场景, 测试视频无场景区分。两组被试随机分配观看不同场景视频。

引入阶段的场景如图 1A 所示，桌后并排坐着演员 A 和演员 B，两者均佩戴墨镜（降低演员眼神对被试的潜在干扰）。桌上放置两根并列柱子，其中一个柱子位于两演员之间，另一柱子位于演员 B 的左侧（即右侧柱子）。在 JI 场景下，两位演员相互转头看向对方并微笑，进行简短对话（演员 A：“我喜欢玩积木”，演员 B：“我今天要去玩积木”）。而在 NJI 场景中，两名演员的对话内容与 JI 场景相同，但演员 B 在回应演员 A 时延迟约 1 s。在 JI 场景中，两名演员的言语交流流畅而自然，而在 NJI 场景中，两名演员各自发表言论，无眼神交流。

演示阶段播放 3 次，如图 1B 所示。演员 A 拿起一块积木，高声数三下，并将其放置于中间柱子上，接着口头表达“好了”。随后，演员 B 高声数三下，取下中间柱子上的积木并放置于右侧柱子上，

然后表示“好了”。在 JI 场景下，演员 A 和演员 B 在对方放置积木时注视着对方的动作，动作完成后，两人互相对视并微笑。但在 NJI 场景下，演员 A 和演员 B 在对方放置积木的过程中，视线转移到其他地方，且动作完成后无任何眼神交流。

测试阶段播放 3 次，如图 1C 所示，测试阶段视频不再区分不同场景。演员 B 离开，演员 A 则坐到演员 B 的位置上，从桌下取出一块积木，将其放置于两根柱子之间，接着，演员 A 对着镜头说：“我又找到了一块积木，我应该把它放在哪里呢？”此时，视频中将会出现一块挡板，遮蔽演员 A 的上半身、手臂及两根柱子，使得被试无法观察其将积木放置在何处。

红色、蓝色柱子及两位演员的位置在试验过程中平衡出现。

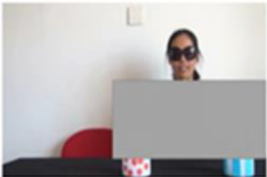
	JI	NJI
	 中间 右侧	 中间 右侧
B、演示阶段	JI	NJI
	 中间 右侧  中间 右侧	 中间 右侧  中间 右侧
C、测试阶段	JI	NJI
	 中间 右侧	 中间 右侧

图 1 试验流程 [JI] 联合意图；[NJI] 非联合意图。

1.3 试验程序

采用 TobiiX3-120 眼动仪进行视觉追踪，采样率为 120 Hz。被试坐在距离眼动仪约 60 cm 的舒适椅子上，先进行眼动仪 5 点校准，随后进入正式试验。

1.4 眼动数据特征提取

3 名被试（2 名 ASD 男童和 1 名 TD 女童）的眼动数据因数据缺失率较高（分别为 100%、95.62% 和 100%）而被剔除，最终数据集包括 56 名 ASD 儿童和 49 名 TD 儿童。使用 Tobii Studio 软件提取眼动追踪数据中的视觉注视特征。本研究基于场景中人物和人物从事的活动划分为 11 个兴趣区（area of interest, AOI），包括人的头部（眼、口、面部）、身体（手）、活动（圆柱和积木）（图 2）。

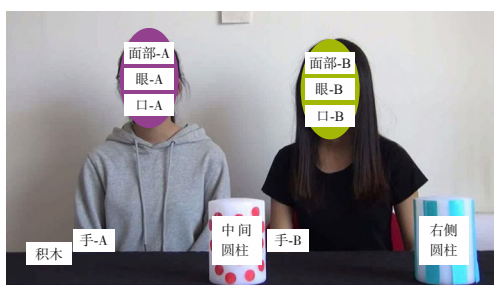


图 2 11 个 AOI 划分示意图

对原始眼动数据进行划分，按照视频引入阶段、演示阶段 1、演示阶段 2、演示阶段 3、测试阶段 1、测试阶段 2、测试阶段 3 等 7 个试验阶段进行分割，得到 77 个基于 AOI 的特征（7 片段 × 11 个 AOI）。

对两组被试在观看 7 个视频过程中，注视上述 11 个 AOI 的注视时长占比和注视次数占比进行计算，并将其用于 ML 分类建模。注视时长占比定义为：在观看某段视频时，注视某个特定 AOI 的总持续时间与该段视频总有效注视时间之比。注视次数占比定义为：在观看某段视频时，注视某个特定 AOI 的总次数与该段视频总注视次数之比。如“中间柱子演示 1_注视时长占比”，代表被试在观看演示阶段 1 视频期间对中间柱子的注视时间占本段视频总注视时间的比例。

考虑到场景（NJI 和 JI）因素对试验结果的影响，将场景也加入特征集中，共构造 157 个特征：（11 个 AOI × 7 视频）×（2 种眼动数据统计量：注视时长占比和注视次数占比）+ 年龄 + 性别 +（社会场景：NJI 和 JI），即（11 × 7 × 2 + 1 + 1 = 157）。

1.5 ML 程序

通过算法，使得机器能从大量历史数据中学习规律，从而对新的样本进行智能识别或对未来

进行预测^[36-39]。

1.5.1 数据集 依据提取的 157 个特征，组成 108（被试）× 157（特征）的数据集。删除有效数据低于 30% 的 43 个指标以及数据缺失率较高的 3 个被试数据，最终，用于 ML 的原始数据集为 105（被试）× 114（特征）的矩阵。

1.5.2 分类器 首先采用常规的分类器，包括支持向量机（support vector machine）、线性判别算法（linear discriminant analysis）、决策树（decision tree, DT）、随机森林（random forest）和邻近算法（K-nearest neighbor, KNN）进行分类。以上各分类器在既往 ASD 识别方面已有广泛应用^[33, 36-39]。

1.5.3 分类 ML 流程如图 3 所示。为最大限度减少潜在的过拟合问题，在 ML 训练模型和测试模型中实施留一交叉验证法，通过计算其准确度、灵敏度和特异度以评估 ML 模型的性能。

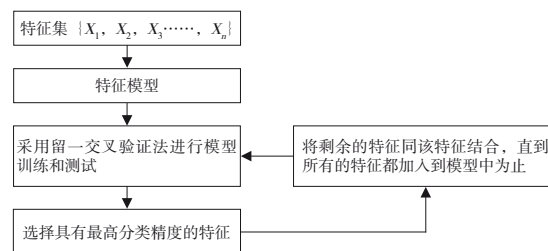


图 3 ML 流程图

2 结果

将 114 个特征引入 ML 模型，采用支持向量机、线性判别算法、DT、随机森林、KNN（K=1、3、5、7）等 8 种分类器进行分析。结果显示，采用 DT、KNN（K=1）、KNN（K=5）分类器的分类准确度均可达到 80% 以上，分别为 80.95%、80.95% 和 81.90%。

为进一步提高分类准确度，尝试在原有指标基础上构建新指标。遵循保证新指标物理特征可解释性和减少运算量的两大原则，对原指标进行如下处理：（1）由于测试阶段在前一步 ML 中贡献度相对较小，后期 ML 不再将测试阶段的特征计入；（2）按照物理特征可解释性，将数据按照阶段、类型（注视时长占比和注视次数占比）分类，共分为 8 组，即（1 个引入阶段 + 3 个演示阶段）× 2（注视时长占比和注视次数占比）；（3）同一类型、同一阶段的 AOI 指标两两求和得到新指标；（4）由于眼和口分别与面部有重合部分，因此眼和口不再分别与面部做求和处理。按照上

述原则，最后用于处理的数据集为 105（被试）× 370（特征）矩阵。

将组合后的指标再次输入 8 种分类器，采用相同的 ML 方法，结果显示，DT 分类器分类准确度最高，准确度高达 91.43%，灵敏度为 92.86%，特异

度为 89.80%，区分 ASD 组和 TD 组分类器的受试者操作特征曲线的曲线下面积为 0.909（ $P<0.001$ ），说明分类器性能优良，见图 4。表 2 展示了用于区分 ASD 和 TD 的 10 组关键特征，以及随着特征组合的变化而得到的 DT 分类性能。

表 2 有效区分 ASD 组和 TD 组的特征及 DT 分类性能随特征组合的变化

特征组合	特征名称	准确度 (%)	灵敏度 (%)	特异度 (%)
组合 1	口-A 演示 2_注视次数占比+手-B 演示 2_注视次数占比	72.38	75.00	69.39
组合 2	~+右侧柱子演示 3_注视时长占比+手-A 演示 3_注视时长占比	79.05	82.14	75.51
组合 3	~+眼-B 演示 2_注视次数占比+手-B 演示 2_注视次数占比	80.00	85.71	73.47
组合 4	~+积木演示 3_注视次数占比+手-B 演示 3_注视次数占比	80.00	83.93	75.51
组合 5	~+口-A 引入_注视次数占比+积木引入_注视次数占比	80.00	83.93	75.51
组合 6	~+手-A 演示 2_注视次数占比+手-B 演示 2_注视次数占比	80.95	80.36	81.63
组合 7	~+眼-B 演示 1_注视次数占比+中间柱子演示 1_注视次数占比	85.71	85.71	85.71
组合 8	~+中间柱子演示 3_注视次数占比+手-A 演示 3_注视次数占比	89.52	91.07	87.76
组合 9	~+面部-A 演示 3_注视次数占比+右侧柱子演示 3_注视次数占比	90.48	91.07	89.80
组合 10	~+面部-B 引入_注视时长占比+右侧柱子引入_注视时长占比	91.43	92.86	89.80

注：~表示在前一次迭代中的所有特征，如组合 10 的~表示在第 10 次迭代中之前选择的所有 9 组特征。

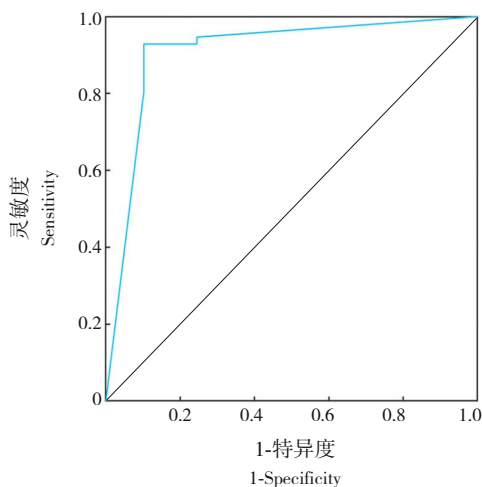


图 4 DT 分类器最高分类准确度对应的受试者操作特征曲线

表 3 为两种社交场景下 10 组混合特征模型的混淆矩阵。NJI 下的分类精度达 98.15%；JI 下分类精度为 84.30%，提示 NJI 下指标对 ASD 和 TD 的区分能力更强。

表 3 两种社交场景下基于 DT 最高分类精度^a的混淆矩阵

组别	NJI		JI	
	TD 组	ASD 组	TD 组	ASD 组
TD 组	25(TN)	0(FN)	19(TN)	4(FN)
ASD 组	1(FP)	28(TP)	4(FP)	24(TP)

注：a 示分类精度 = $(TP+TN) / (TP+FP+FN+TN)$ 。[NJI] 非联合意图；[JI] 联合意图；[TD] 正常发育；[ASD] 孤独症谱系障碍；[TN] 真阴性数；[FP] 假阳性数；[FN] 假阴性数；[TP] 真阳性数。

3 讨论

本研究将 AOI 注视时长占比和注视次数占比作为指标，使用 DT 分类器对 18 个关键指标进行两两配对，组成 10 个指标组，可获得高达 91.43% 的高分类准确度，表明本研究建立了一个眼动追踪技术和 ML 算法相结合的有效辅助诊断 ASD 儿童的模型，为临床上依据客观指标开展 ASD 的辅助诊断提供了证据支持。

本研究中 18 个关键指标分别对应活动场景中人的面部、身体和活动范围，表明两组儿童在对社交场景的主要组成部分的注意方面均存在显著差异，这和既往考察 ASD 儿童对社交场景的注意研究^[30]一致。Kaliukhovich 等^[17]发现，与 TD 儿童相比，ASD 儿童在社交场景中对他人面部的关注较少。而本研究更进一步发现，ASD 儿童在 JI 社交场景中对角色活动的关注也明显减少，表明在 JI 条件下，所需的较高认知负荷可能促成了这种注意力模式。

与既往 ML 在 ASD 早期诊断中的应用研究^[26, 40-41]相比，本研究的范式更为复杂，通过对话和表情传达社交意图，在社会环境中嵌入了较多的非社会性因素，且视频持续时间较长。本研究涉及的样本规模较大（108 名），与之前基于眼动的 ML 研究^[28-32]相比，准确度方面表现相当。通过构建新的指标发现，指标重构是提高 ML 准确度

的一个有效手段，为后续采用 ML 进行 ASD 分类提供借鉴。

本研究也存在一些局限性：（1）仅使用眼动数据进行预测，未来研究应综合考虑与其他模态数据的融合，如脑电图和神经成像，以提高模型准确性；（2）仅研究了一种社交场景，未来研究应扩展到不同类型的社交情境，以了解注意力模式的差异；（3）研究样本仅涵盖高功能 ASD 儿童，这一选择基于许多低功能 ASD 儿童在进行眼动仪的校正等试验程序时可能会遇到困难，表现出较低的合作度。样本选择的单一性限制了研究的外推性，因此未来的研究需优化试验程序，以便更全面地研究整个 ASD 儿童的注意模式。

综上所述，本研究以眼动注视指标为特征，采用不同 ML 算法对 ASD 和 TD 儿童进行分类，分类准确度达到 80% 以上。对特征进行重构后，分类准确度提升至 91.43%，这一发现不仅验证了 ML 算法在自动识别 ASD 方面的潜力，同时突显了重构指标在提高分类准确度方面的效果，为未来改进 ML 算法性能提供了可行的方向。

作者贡献声明：程蓉负责研究设计、数据分析、论文撰写；赵众负责提供关键理论支持，对论文的结构和语言进行修订；侯文文负责研究实施、数据收集和数据分析；周刚、廖昊天、张雪负责数据分析；李晶负责项目整体规划设计和实施，协调团队工作，负责论文的最终撰写和修订。

利益冲突声明：所有作者声明无利益冲突。

[参 考 文 献]

- [1] Zwaigenbaum L, Penner M. Autism spectrum disorder: advances in diagnosis and evaluation[J]. *BMJ*, 2018, 361: k1674. PMID: 29784657. DOI: 10.1136/bmj.k1674.
- [2] Falkmer T, Anderson K, Falkmer M, et al. Diagnostic procedures in autism spectrum disorders: a systematic literature review[J]. *Eur Child Adolesc Psychiatry*, 2013, 22(6): 329-340. PMID: 23322184. DOI: 10.1007/s00787-013-0375-0.
- [3] Li N, Chen G, Song X, et al. Prevalence of autism-caused disability among Chinese children: a national population-based survey[J]. *Epilepsy Behav*, 2011, 22(4): 786-789. PMID: 22079437. DOI: 10.1016/j.yebeh.2011.10.002.
- [4] Masi A, DeMayo MM, Glozier N, et al. An overview of autism spectrum disorder, heterogeneity and treatment options[J]. *Neurosci Bull*, 2017, 33(2): 183-193. PMID: 28213805. PMCID: PMC5360849. DOI: 10.1007/s12264-017-0100-y.
- [5] Hyman SL, Levy SE, Myers SM, et al. Identification, evaluation, and management of children with autism spectrum disorder[J]. *Pediatrics*, 2020, 145(1): e20193447. PMID: 31843864. DOI: 10.1542/peds.2019-3447.
- [6] Shaw KA, Bilder DA, McArthur D, et al. Early identification of autism spectrum disorder among children aged 4 years: Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2020[J]. *MMWR Surveill Summ*, 2023, 72(1): 1-15. PMID: 36952289. PMCID: PMC10042615. DOI: 10.15585/mmwr.ss7201a1.
- [7] Mandell DS, Novak MM, Zubritsky CD. Factors associated with age of diagnosis among children with autism spectrum disorders[J]. *Pediatrics*, 2005, 116(6): 1480-1486. PMID: 16322174. PMCID: PMC2861294. DOI: 10.1542/peds.2005-0185.
- [8] Dalton JC, Crais ER, Velleman SL. Joint attention and oromotor abilities in young children with and without autism spectrum disorder[J]. *J Commun Disord*, 2017, 69: 27-43. PMID: 28704690. DOI: 10.1016/j.jcomdis.2017.06.002.
- [9] Woo BM, Spelke ES. Infants and toddlers leverage their understanding of action goals to evaluate agents who help others[J]. *Child Dev*, 2023, 94(3): 734-751. PMID: 36752158. DOI: 10.1111/cdev.13895.
- [10] Tomasello M, Carpenter M, Call J, et al. Understanding and sharing intentions: the origins of cultural cognition[J]. *Behav Brain Sci*, 2005, 28(5): 675-691. PMID: 16262930. DOI: 10.1017/S0140525X05000129.
- [11] Fawcett C, Kreutz G. Twelve-month-old infants' physiological responses to music are affected by others' positive and negative reactions[J]. *Infancy*, 2021, 26(6): 784-797. PMID: 34120402. DOI: 10.1111/inf.12415.
- [12] Ulber J, Hamann K, Tomasello M. How 18- and 24-month-old peers divide resources among themselves[J]. *J Exp Child Psychol*, 2015, 140: 228-244. PMID: 26283235. DOI: 10.1016/j.jecp.2015.07.009.
- [13] Fawcett C, Gredebäck G. Infants use social context to bind actions into a collaborative sequence[J]. *Dev Sci*, 2013, 16(6): 841-849. PMID: 24118711. DOI: 10.1111/desc.12074.
- [14] Fawcett C, Tunçgenç B. Infants' use of movement synchrony to infer social affiliation in others[J]. *J Exp Child Psychol*, 2017, 160: 127-136. PMID: 28427721. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.03.014.
- [15] Fawcett C, Liszkowski U. Observation and initiation of joint action in infants[J]. *Child Dev*, 2012, 83(2): 434-441. PMID: 22277061. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2011.01717.x.
- [16] Fitzpatrick P, Romero V, Amaral JL, et al. Social motor synchronization: insights for understanding social behavior in autism[J]. *J Autism Dev Disord*, 2017, 47(7): 2092-2107. PMID: 28425022. DOI: 10.1007/s10803-017-3124-2.
- [17] Kaliukhovich DA, Manyakov NV, Bangerter A, et al. Social attention to activities in children and adults with autism spectrum disorder: effects of context and age[J]. *Mol Autism*, 2020, 11(1): 79. PMID: 33076994. PMCID: PMC7574440. DOI: 10.1186/s13229-020-00388-5.
- [18] Frazier TW, Strauss M, Klingemier EW, et al. A meta-analysis of

- gaze differences to social and nonsocial information between individuals with and without autism[J]. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*, 2017, 56(7): 546-555. PMID: 28647006. PMCID: PMC5578719. DOI: 10.1016/j.jaac.2017.05.005.
- [19] 侯文文, 李晶, 李婷玉, 等. 孤独症谱系障碍患者社会性注意异常的机制[J]. *中国科学 (生命科学)*, 2019, 49(1): 59-66. DOI: 10.1360/N052018-00151.
- [20] 李晶, 朱莉琪. 高功能孤独症儿童的合作行为[J]. *心理学报*, 2014, 46(9): 1301-1316. DOI: 10.3724/SP.J.1041.2014.01301.
- [21] Liebal K, Colombi C, Rogers SJ, et al. Helping and cooperation in children with autism[J]. *J Autism Dev Disord*, 2008, 38(2): 224-238. PMID: 17694374. PMCID: PMC2758368. DOI: 10.1007/s10803-007-0381-5.
- [22] Helminen TM, Leppänen JM, Eriksson K, et al. Atypical physiological orienting to direct gaze in low-functioning children with autism spectrum disorder[J]. *Autism Res*, 2017, 10(5): 810-820. PMID: 28244277. DOI: 10.1002/aur.1738.
- [23] Alcañiz M, Chicchi-Giglioli IA, Carrasco-Ribelles LA, et al. Eye gaze as a biomarker in the recognition of autism spectrum disorder using virtual reality and machine learning: a proof of concept for diagnosis[J]. *Autism Res*, 2022, 15(1): 131-145. PMID: 34811930. DOI: 10.1002/aur.2636.
- [24] Kong XJ, Wei Z, Sun B, et al. Different eye tracking patterns in autism spectrum disorder in toddler and preschool children[J]. *Front Psychiatry*, 2022, 13: 899521. PMID: 35757211. PMCID: PMC9218189. DOI: 10.3389/fpsy.2022.899521.
- [25] Wan G, Kong X, Sun B, et al. Applying eye tracking to identify autism spectrum disorder in children[J]. *J Autism Dev Disord*, 2019, 49(1): 209-215. PMID: 30097760. DOI: 10.1007/s10803-018-3690-y.
- [26] Jiang M, Francis SM, Srishyla D, et al. Classifying individuals with ASD through facial emotion recognition and eye-tracking[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2019, 2019: 6063-6068. PMID: 31947228. DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857005.
- [27] Kanhirakadavath MR, Chandran MSM. Investigation of eye-tracking scan path as a biomarker for autism screening using machine learning algorithms[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(2): 518. PMID: 35204608. PMCID: PMC8871384. DOI: 10.3390/diagnostics12020518.
- [28] Liu W, Li M, Yi L. Identifying children with autism spectrum disorder based on their face processing abnormality: a machine learning framework[J]. *Autism Res*, 2016, 9(8): 888-898. PMID: 27037971. DOI: 10.1002/aur.1615.
- [29] Minissi ME, Chicchi Giglioli IA, Mantovani F, et al. Assessment of the autism spectrum disorder based on machine learning and social visual attention: a systematic review[J]. *J Autism Dev Disord*, 2022, 52(5): 2187-2202. PMID: 34101081. PMCID: PMC9021060. DOI: 10.1007/s10803-021-05106-5.
- [30] Wei Q, Cao H, Shi Y, et al. Machine learning based on eye-tracking data to identify autism spectrum disorder: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Biomed Inform*, 2023, 137: 104254. PMID: 36509416. DOI: 10.1016/j.jbi.2022.104254.
- [31] Zhao Z, Tang H, Zhang X, et al. Classification of children with autism and typical development using eye-tracking data from face-to-face conversations: machine learning model development and performance evaluation[J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(8): e29328. PMID: 34435957. PMCID: PMC8440949. DOI: 10.2196/29328.
- [32] Zhao Z, Wei J, Xing J, et al. Use of oculomotor behavior to classify children with autism and typical development: a novel implementation of the machine learning approach[J]. *J Autism Dev Disord*, 2023, 53(3): 934-946. PMID: 35913654. DOI: 10.1007/s10803-022-05685-x.
- [33] 李西, 田真玲, 姜孟. 机器学习在孤独症筛查与诊断中的应用研究进展[J]. *中国特殊教育*, 2022(9): 47-54. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3728.2022.09.006.
- [34] American Psychiatric Association, DSM-5 Task Force. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-5[M]. 5th ed. Washington: American Psychiatric Association, 2013: 36-37.
- [35] 张厚粲, 王晓平. 瑞文标准推理测验在我国的修订[J]. *心理学报*, 1989, 21(2): 113-121.
- [36] Kang J, Han X, Song J, et al. The identification of children with autism spectrum disorder by SVM approach on EEG and eye-tracking data[J]. *Comput Biol Med*, 2020, 120: 103722. PMID: 32250854. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2020.103722.
- [37] 康健楠, 韩晓雅, 耿新玲, 等. 基于眼动追踪技术的孤独症谱系障碍儿童面孔异常加工识别研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37(7): 933-936. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2022.07.012.
- [38] 杨剑锋, 乔佩蕊, 李永梅, 等. 机器学习分类问题及算法研究综述[J]. *统计与决策*, 2019, 35(6): 36-40. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2019.06.008.
- [39] 张润, 王永滨. 机器学习及其算法和发展研究[J]. *中国传媒大学学报 (自然科学版)*, 2016, 23(2): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4793.2016.02.002.
- [40] Chita-Tegmark M. Social attention in ASD: a review and meta-analysis of eye-tracking studies[J]. *Res Dev Disabil*, 2016, 48: 79-93. PMID: 26547134. DOI: 10.1016/j.ridd.2015.10.011.
- [41] Yaneva V, Ha LA, Eraslan S, et al. Detecting high-functioning autism in adults using eye tracking and machine learning[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(6): 1254-1261. PMID: 32356755. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.2991675.

(本文编辑: 王颖)

(版权所有©2024中国当代儿科杂志)