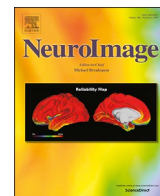




神经图像

期刊主页: www.elsevier.com/locate/neuroimage

婴儿出生后 3-8 个月内视图不变的面部加工纵向研究

市川弘子 ^{a,b,c,*}, Emi Nakato ^{b,d,1,3}, Yasuhiko Igarashi ^{e,4}, Masato Okada ^{e,f},
So Kanazawa ^g, Masami K. Yamaguchi ^a, Ryusuke Kakigi ^d^a192-0393 日本东京八王子中央大学心理学系^b日本东京都千代田区中央大学研究与发展计划 (112-8551)^c日本科学振兴会, 日本东京千代田, 102-8471^d444-8585 日本爱知县冈崎市国立生理科学研究所综合生理学系^e东京大学前沿科学研究生院, 日本千叶县柏市, 邮编 277-8561^f日本埼玉县和光市理研脑科学研究所, 邮编 351-0106^g日本女子大学心理学系, 日本神奈川县川崎市, 邮编 214-8565

ARTICLE INFO

关键词:

婴儿纵向研究
面部加工视图依赖性
近红外光谱 NIRS
线性回归分析

ABSTRACT

视图不变的人脸处理在生命早期就已出现。之前的一项研究 (Nakato 等人, 2009 年) 使用近红外光谱测量了婴儿双侧颞区对正面和侧面人脸的血液动力学反应, 据报道, 这些区域参与了人脸加工。据报道, 5 个月大的婴儿对正面人脸的氧合血红蛋白 (oxy-Hb) 反应增加, 但对侧面人脸的反应却没有增加。与此相反, 8 个月大的婴儿对轮廓脸和正面脸的氧合血红蛋白反应都有所增加。在本研究中, 我们采用了前一项研究中开发的实验方法, 在连续 5 个月 (出生后最初 3-8 个月) 的每个月对视图不变面孔处理的发展进行了研究。我们纵向测量了 14 名婴儿对正面和侧面人脸的血液动力学反应。通过纵向测量, 我们可以研究每个受试者的个体差异。我们使用线性回归分析法模拟了每个婴儿对正面和侧面人脸的血液动力学氧-Hb 反应。与正面人脸相比, 侧面人脸的处理出现得更晚, 改进也更大。我们还发现, 面孔处理的改善速度与 3 个月大时对面脸的血液动力学反应之间存在反相关性。使用线性回归法对 14 名婴儿的平均血液动力学数据进行分组分析后发现, 轮廓面孔的处理在 5 到 6 个月大时出现。婴儿视图不变的面孔处理首先出现在正面的面孔上。随后出现的是对侧面人脸的处理。

1. 引言

视图不变的人脸处理在婴儿生命早期就已出现。据报道, 新生儿无法通过侧面视图识别先前在正面视图中学到的人脸身份。同样, 据报道他们也无法通过正面视图识别出之前在侧面视图中学到的女性面孔的身份 (Turati 等人, 2008 年)。先前 Fagan (1976 年) 对较大婴儿进行的一项研究报告称, 约 7 个月大的婴儿可识别出男性面孔的侧面图

的识别能力。Rose、Jankowski 和 Feldman (2002 年) 报告说, 12 个月大的婴儿能通过侧面视图成功地识别出先前在正面视图中学到的婴儿脸部特征, 而 7 个月大的婴儿则不具备这种能力。尽管上述研究在实验过程和所使用的面部图像方面有所不同, 但它们都表明, 婴儿识别面部特征的能力是在出生后第一年逐渐发展起来的, 而与视角无关。

通过测量大脑的

* 通讯作者。东京理科大学科学技术学院，日本千叶县野田市山崎 2641 号（邮编 278-8510）。

电子邮件地址：ichi@rs.tus.ac.jp (H. Ichikawa)。

¹这些作者对这项工作做出了同等贡献。

²市川弘子现就职于东京理科大学科学技术学院。

³Emi Nakato 现就职于爱媛县立保健科学大学护理系。

⁴Yasuhiko Igarashi 现就职于日本科学技术振兴机构（JST）PRESTO 和国立材料科学研究所材料数据和综合系统研究与服务部。

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.031>

2018 年 7 月 12 日收到；2018 年 10 月 26 日收到修订稿；2018 年 11 月 20 日接受

2018 年 12 月 5 日在线提供

1053-8119/© 2018 作者。出版商：Elsevier Inc. 本文为 CC BY-NC-ND 许可下的开放存取文章 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)。

Ichikawa 等人, 2010; Ichikawa 等人, 2013; Kobayashi 等人, 2011; Kobayashi 等人, 2018; Nakato 等人, 2009; Nakato 等人, 2011a; Nakato 等人, 2011b; Otsuka 等人, 2007; Yamashita 等人, 2012)。上述研究使用近红外光谱 (NIRS) 测量婴儿观察人脸图像时的脑血流动力学变化。由于婴儿无法在测量过程中耐心等待, 因此用于测量大脑活动的设备应该是非侵入性的、无声的, 并且易于放置在婴儿的头部。以往的研究主要使用事件相关电位 (ERP) 或近红外光谱来测量婴儿的大脑活动。以往使用 ERP 的研究显示, 不同年龄段的婴儿对人脸的皮层电反应存在发育差异 (de Haan 等人, 2002 年; Halit 等人, 2003 年)。在上述研究中, 研究人员向受试者展示了人脸和猴子脸的图像, 无论是向上还是向下, 并比较了成人和婴儿对人脸图像的事件相关电位反应。与 3 个月或 6 个月大的婴儿相比, 12 个月大的婴儿对人类直立面孔图像的皮层电反应与成人更为相似。上述研究结果表明, 与人脸处理有关的皮层反应在婴儿出生后的第一年逐渐成熟并专门化为直立的人脸。

据报道, 与视图无关的人脸识别可以在出生后 8 个月内出现。Nakato 等人 (2009 年) 在 5 个月和 8 个月大的婴儿被动观察正面和侧面的面部图像时, 使用近红外光谱测量了颞上沟 (STS) 周围双侧颞区对人脸的血液动力学反应。据报道, STS 参与了成人 (Kanwisher 等人, 1997 年; Kanwisher 和 Yovel, 2006 年; Puce 等人, 1996 年) 和婴儿 (Ichikawa 等人, 2010 年; Ichikawa 等人, 2011 年) 的面部识别、2010; Ichikawa 等人, 2013; Kobayashi 等人, 2011; Kobayashi 等人, 2018; Nakato 等人, 2009; Nakato 等人, 2011a; Nakato 等人, 2011b; Otsuka 等人, 2007; Yamashita 等人, 2012)。在 Nakato 等人 (2009 年) 的研究中, 5 个月大的婴儿仅对额叶视图显示右颞区的氧合血红蛋白 (oxy-Hb) 反应增加。相比之下, 8 个月大的婴儿在正面和侧面视图中的右颞区都表现出氧合血红蛋白 (oxy-Hb) 反应增加。8 个月大婴儿和 5 个月大婴儿的反应差异表明, 对轮廓面孔的面部加工是在出生后 5 个月逐渐出现的。

近红外光谱还被用于研究某些大脑区域的发育情况 (Franceschini 等人, 2007 年; Moriguchi 和 Hiraki, 2011 年; Perlman 等人, 2016 年)。Blasi、Lloyd-Fox、Johnson 和 Elwell (2014 年) 在间隔 8.5 个月的两个时间点纵向评估了婴儿大脑发育与社会感知的关系。作者报告称, 无论重新连接 NIRS 探针与否, 测试重复可靠性都趋于一致。Webb 等人 (2005 年) 评估了同一年龄组 (4–12 个月大的婴儿) 对面部和物体图像的 ERP 反应的成熟变化。作者报告说, 在婴儿出生后的第一年里, ERP 成分的振幅和潜伏期都发生了变化。这些研究表明, 利用近红外光谱对人脸的血液动力学反应进行纵向测量, 可用于研究出生后第一年内人脸处理

神经基础的发育变化。这种纵向设计可以澄清人脸处理过程中的个体差异, 并扩展我们对早期人脸处理过程的理解。比较出生后头半年出现的脸部轮廓视图处理和出生后较早出现的脸部正面视图处理, 是一个适合进行纵向设计研究的课题, 以阐明脸部处理所涉及的不同发育轨迹。

本研究的重点是视图不变的人脸处理。

目的是研究婴儿早期对人脸的血液动力学反应的纵向变化。我们纵向测量了 14 名婴儿在 3 到 8 个月大的 6 个时间点对正面和侧面人脸的血液动力学反应。多项研究表明, 面孔特异性大脑活动

在 3 个月大的婴儿中应该可以观察到（例如 Halit 等人，2003 年；Johnson 和 Morton，1991 年），8 个月大的婴儿显示出与侧面和正面人脸处理相关的血流动力学反应（Kobayashi 等人，2011a；Nakato 等人，2009 年）。为了解释婴儿在视图不变的面孔处理能力发展过程中的个体差异，我们使用线性回归函数 $y = ax + b$ 对每个月龄的正面和侧面面孔的血液动力学反应进行了建模，然后检查了各个回归模型的斜率（ a ）和截距（ b ）值。此外，为了研究视图不变人脸识别能力发展的总体趋势，我们还将讨论各个模型参数的分布情况。由于之前的一项研究（Nakato 等人，2009 年）报道 8 个月大的婴儿对轮廓面孔表现出血液动力学反应，而 5 个月大的婴儿则没有，因此我们假设对额头面孔的血液动力学反应将在 3 个月大时出现，而对轮廓面孔的血液动力学反应将在出生后 5-8 个月出现。剖面图条件下的线性回归模型的斜率（ a ）大于正面图条件下的模型。此外，截距（ b ）的线性回归模型小于的模型。

2. 方法

2.1. 与会者

研究对象为 14 名健康婴儿（11 名男孩和 3 名女孩）。由于试验次数不足（正面或侧面条件的试验次数均少于 3 次）或运动伪影，有两名婴儿被排除在最终分析之外。本研究获得了中央大学伦理委员会和国立生理科学研究所的批准。研究获得了婴儿父母的书面知情同意。实验按照《赫尔辛基宣言》进行。

2.2. 刺激和设计

所使用的刺激物和研究设计与之前的一项研究（Nakato 等人，2009 年）相同。刺激呈现由测试期和基线期组成。测试期的刺激物是 5 张正面或侧面的女性脸部全彩照片（图 1）。半数婴儿的侧面视图为右侧，其余婴儿为左侧。面部刺激物的大小为 $\sim 17.5^\circ \times 21^\circ$ ，蔬菜刺激物的大小为 $16.8^\circ \times 16.8^\circ$ 。

在正面或侧面条件下，每次试验都会以 1 Hz 的速率随机呈现 5 张面孔。正面视图和侧面视图中显示的面孔在试验中交替出现。正面视图中的面孔出现在一半的试验中，而侧面视图中的面孔出现在另一半的试验中。两个条件的顺序在婴儿之间进行平衡。每次测试的总时间固定为 5 秒钟。

在基线期，5 种蔬菜以 1 Hz 的频率随机播放。为了比较婴儿对人脸（测试期间）和蔬菜（基线期间）的血液动力学反应，必须确保婴儿在观察人脸之前的 3 秒钟内继续观察蔬菜。为此，实验员在基线期开始 10 秒后观察婴儿的行为，并在确认婴儿已持续注视监视器上的蔬菜 3 秒钟后结束基线期。

在基线期和测试期，刺激持续时间均为 800 毫秒，⁽²⁰⁰⁹⁾在刺激间隔 200 毫秒时会出现一个小红叉。为了吸引和保持婴儿的注意力，面部刺激和蔬菜刺激都伴有 1 赫兹的蜂鸣声。脸部刺激和蔬菜刺激使用了两种不同的声音

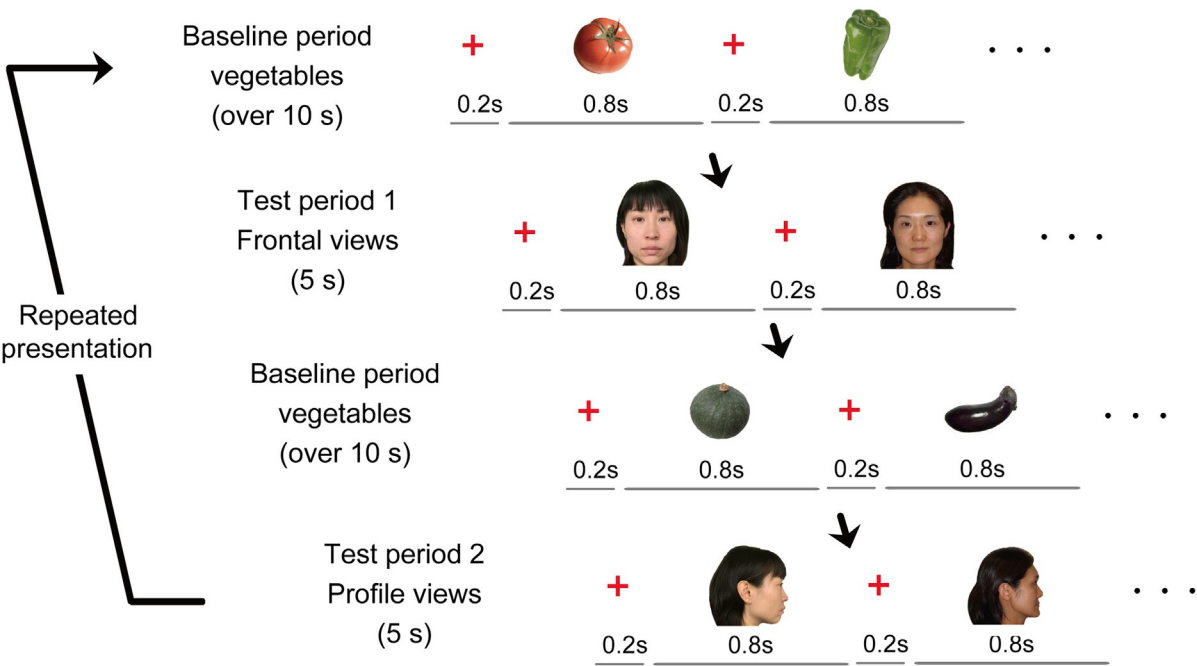


图 1.实验过程。在每次试验中，基线期包括呈现 5 张蔬菜图像。测试期包括 5 张正面和侧面的女性面部图像，测试期为 5 秒钟。每个婴儿在第 1 和第 2 测试阶段的预发顺序都有所改变。

这些声音同时用于正面和侧面条件。声音和视觉刺激之间的关系在不同婴儿之间进行了平衡。

2.3. 仪器和程序

本研究使用的程序和仪器与之前的一项研究（Nakato 等，2009 年）相同。在整个实验过程中，所有的刺激都显示在一个由计算机控制的 22 英寸彩色显像管（CRT）显示器上，分辨率为 1024 × 768 像素。婴儿和 CRT 显示器位于一个用铁杆制成的围栏内，围栏用布覆盖。婴儿与显示器之间的距离约为 40 厘米。CRT 显示器的两侧各有一个扬声器。监视器屏幕下方有一个电荷耦合器件（CCD）摄像机。在整个实验过程中，婴儿的行为都通过这台摄像机进行录像。实验人员可通过连接针孔摄像机的视频监视器观察婴儿的行为。

每个婴儿都坐在实验者腿上，面对电脑屏幕接受测试。在测量大脑活动时，婴儿被动地观看刺激物，只要他们愿意，就可以一直观看刺激物。

2.4. 录音

我们使用日立 ETG-4000 系统（Hitachi Medical；日本千叶）以 0.1 秒的时间分辨率通过 24 个通道测量氧合血红蛋白、脱氧血红蛋白（deoxy-Hb）和总血红蛋白浓度的血流动力学变化。其中 12 个通道用于右颞区的测量，12 个通道用于左颞区的测量。两种波长的近红外

线（695 纳米和 830 纳米）通过头骨投射。每个通道的近红外线光照强度为 0.4 mW。

近红外光谱探头（日立医疗）包含 9 根光纤（3 × 3 阵列），由 5 个发射器和 4 个探测器组成。光纤用软硅支架固定。发射器和探测器之间的距离设定为 2 厘米。每对相邻的发射器和

检测光纤定义了一个测量通道。

我们根据国际10-20系统（Jasper, 1958年；参见Honda等人, 2010年；Ichikawa等人, 2010年；Kobayashi等人, 2011年；Kobayashi等人, 2012年；Nakato等人, 2011年a；Nakato等人, 2011年b；Yamashita等人, 2012年, 其他从相同部位记录的婴儿研究），将探针放在以T5和T6为中心的两侧颞孔区的相同位置。

当探针就位时，实验员要确保光纤正确接触到每个婴儿的头皮。日立 ETG-4000 系统会自动检测接触是否充分，以测量每个通道中出现的光子。如果纤维与婴儿头皮之间因头发干扰而无法实现充分接触，则该通道将被排除在分析之外。

2.5. 数据分析

在进行数据分析之前，我们对婴儿的行为录像进行了监控，以确定用于统计分析的有效试验。当出现以下情况时，我们会将试验排除在分析之外：婴儿远离面部刺激或变得挑剔；婴儿在实验过程中回头看实验者的脸；或通过分析原始近红外光谱数据时间序列的急剧变化检测到运动伪影。

来自各个通道的原始氧-血红蛋白、脱氧-血红蛋白和总-血红蛋白数据经过 0.02-2.0 Hz 的数字带通滤波，以去除因心跳脉动或纵向信号漂移而产生的噪音（Ichikawa 等人, 2013 年）。每个通道的原始数据在一个受试者的试验中以 0.1 秒的时间序列平均，时间分辨率从测试期开始前 1 秒到测试期结束后 1 秒（Nakato 等人, 2009 年）。我们使用原始氧-血红蛋白、脱氧-血红蛋白和总-血红蛋白数据的时间序列来计算每个时间点的 Z 值，以检查人脸出现时的血流动力学反应与基线期（蔬菜图像出现时）的血流动力学反应之间的偏差。分别计算每个子对象中每个通道在正面和侧面条件下的氧-血红蛋白、脱氧-血红蛋白和总-血红蛋白的 Z 值。Z 值按以下公式计算：

$$d = (m_{test} - m_{baseline}) / sd$$

m_{test} 代表测试期间每个时间点的平均原始数据， $m_{baseline}$ 代表基线期间平均原始数据的平均值。 sd 代表基线期间数据的标准偏差。用于计算 Z 分数的 "基线" 是每个测试期开始前的 1 秒钟，它反映了观察蔬菜图像期间的激活情况。对每个测量区域内 12 个通道的 Z 分数进行平均，以提高信噪比。通道 1-12 的数据来自左颞区，通道 13-24 的数据来自右颞区。虽然近红外光谱仪的原始数据原本是相对值，不能直接对不同受试者或不同通道的数据进行平均，但归一化数据（如 Z 分数）可以不分单位进行平均（Schroeter 等人，2003 年；Matsuda 和 Hiraki，2006 年；Shimada 和 Hiraki，2006 年）。

与之前的研究（Nakato 等人，2009 年）一样，我们取人脸刺激开始后 4 到 5 秒期间的 Z 分数平均值。我们对两个颞区在人脸刺激开始后 4 到 5 秒内的平均 Z 值进行了双尾单样本 t 检验，并将其与偶然水平 0（基线）进行了比较。由于本研究的目的是描述每位受试者的发育轨迹，因此我们以年龄为因变量，对每位受试者的 Z 评分进行了线性回归分析。在之前的一项研究（Nakato 等人，2009 年）中，我们观察到了实验条件之间以及左右半球之间的差异。因此，我们对每个实验条件和每个大脑半球分别进行了回归分析。此外，为了研究线性回归图中的个体差异，我们分析了线性回归模型中的嵌入参数。根据之前的一项研究（Nakato 等人，2009 年），我们认为本研究应只关注氧-血红蛋白数据。因此，我们在此仅报告我们对氧-血红蛋白血液动力学数据的分析。

3. 成果

我们对 14 名婴儿的血液动力学反应进行了分析，这些婴儿在每个测量时间点的正面视图和侧面视图条件下都观察到了 2 次或 2 次以上的刺激试验。表 1 列出了有效试验的平均次数。我们以条件和年龄为因素，对有效试验次数进行了双因素方差分析（ANOVA）。我们发现不同条件和不同年龄之间的平均试验次数没有明显差异。

为了解释纵向近红外光谱测量中视图不变人脸处理发展的个体差异，我们对婴儿对人脸的血液动力学反应与接受测试的年龄之间的关系进行了线性回归分析。每个婴儿在每个条件下的血流动力学反应是通过计算刺激开始后 4 到 5 秒的 Z 值平均值、每个月和每个条件下的所有试验得出的。

我们拟合了一个线性回归模型，并计算了正面和侧面以及左右颞区的斜率（a）和截距（b）。线性回归模型的斜率（a）代表每月血液动力学反应的增加，斜率大的模型比斜率小的模型预测出的人脸血液动力学反应更大。线性回归模型的截距（b）代表 3 个

月大时对面脸的血液动力学反应，因此截距越大的模型预测人脸的血液动力学反应越大。

表 1
有效试验次数的平均数和标准差。

	3 m	4 m	5m	6m	7m	8m
正面图	4.73	5.87	5.80	5.53	4.20	4.67
(标清)	1.79	1.88	2.34	1.96	1.57	1.76
简介视图	4.93	5.27	4.73	5.33	4.20	4.13
(标清)	1.62	1.67	2.19	2.09	1.15	1.68

与截距较小的模型相比，3个月大时的血流动力学反应更大。

图2显示了每位受试者在3到8个月期间的每个年龄段，在正面和侧面条件下左颞部和右颞部的血氧浓度Z值。回归模型 $y = ax + b$ 中的斜率 a 在剖面条件下大于在正面条件下。表2列出了斜率和截距的估计值。

在线性回归模型中，剖面图条件下右侧颞区14个婴儿中有11个婴儿的斜率大于正面图条件下的斜率，左侧颞区有12个婴儿的斜率大于正面图条件下的斜率。斜率的重复测量方差分析包含两个因素：条件（正面与侧面）和测量区域（右侧与左侧）。斜率的方差分析显示条件的主效应显著， $F(1,13) = 9.10, p = .010, \text{partial } \eta^2 = 0.41$ 。

在14名婴儿中，右颞区有12名婴儿在侧面测量条件下的截距小于正面测量条件下的截距，左颞区有12名婴儿在侧面测量条件下的截距小于正面测量条件下的截距。将截距与条件（正面视图与侧面视图）和测量区域（右侧与左侧）这两个因素进行重复测量方差分析，结果显示条件的主效应显著， $F(1,13) = 6.18, p = .027, \text{partial } \eta^2 = 0.32$ 。

为了关注个体在发育轨迹上的差异，我们进一步分析了模型中斜率和截距参数的分布。如图3所示，我们将斜率绘制成y值，将截距绘制成x值。如代表参数分布的各散点图所示，斜率和截距呈负相关（正面条件下的左颞面积，Pearson's $r = -0.79, p = .00$ ；正面条件下的右颞面积， $r = -0.88, p = .00$ ；侧面条件下的左颞面积， $r = -0.96, p = .00$ ；侧面条件下的右颞面积， $r = -0.54, p = .46$ ）。

为了说明斜率和截距之间的相关性在多大程度上解释了个体差异的方差，我们对斜率和截距进行了主成分分析。图3中的绿线表示第一个主成分，它代表了最大的数据方差。第一主成分解释了正面条件下左颞区模型参数分布中98.3%的方差，解释了正面条件下右颞区模型参数分布中98.9%的方差，解释了侧面条件下左颞区模型参数分布中99.6%的方差，解释了侧面条件下右颞区模型参数分布中93.6%的方差。

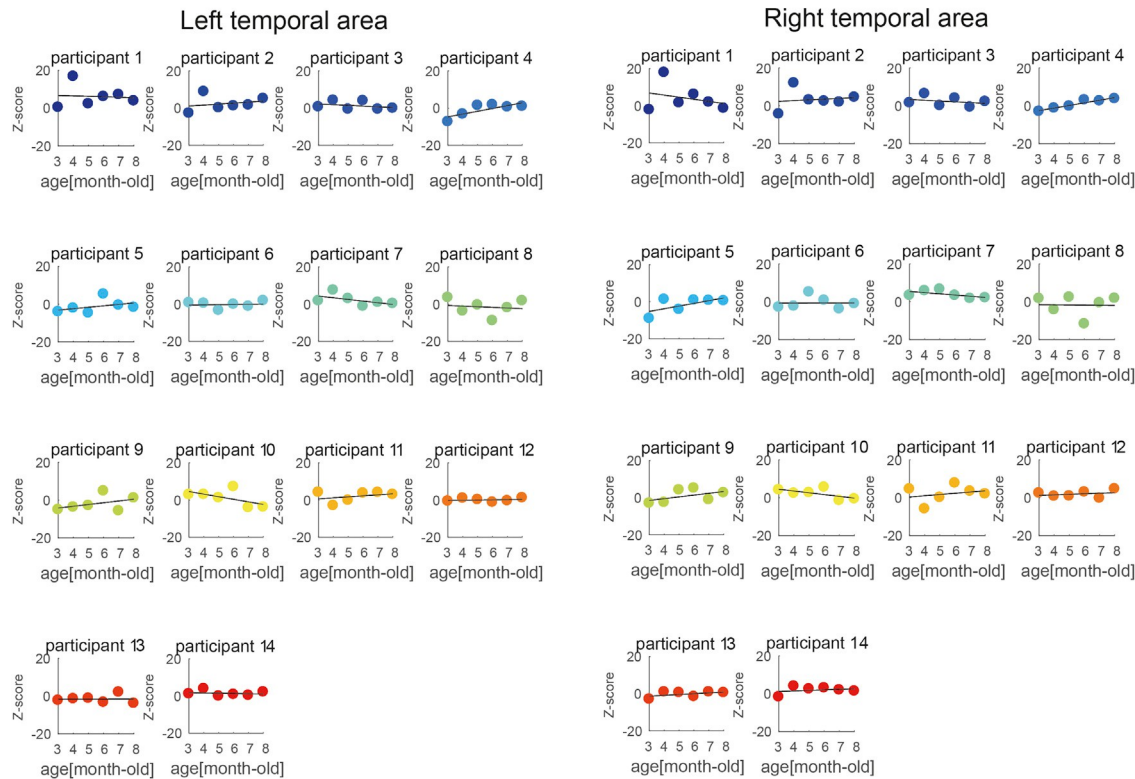
为了研究婴儿回归模型的总体趋势，我们绘制了所有14名受试者氧-血红蛋白浓度的Z值与年龄的函数关系图（图4）。与上述数据分析一致，侧面视图条件下的回归线比正面视图条件下的回归线斜率大、截距小。我们还计算了x-截距，它表示预测的血流动力学反应等于基线值0的时间点。额叶条件下线性回归模型的x-截距小于3个月（左颞区模型 $= -2.43$ ，右颞区 $= -1.65$ ），而侧面条件线性回归模型的x截距接近5个月（左颞区模型 $= 5.79$ ，右颞区模型 $= 5.28$ ）。

4. 讨论

在本研究中，我们纵向测量了14名婴儿从3个月大到8个月大期间每个月对正面和侧面人脸的血液动力学再反应。我们研究

了视图不变面孔处理发展过程中的个体差异。我们使用线性回归函数对每个婴儿在每个年龄段对正面和侧面人脸的血氧反应进行了建模，其参数反映了人脸处理能力发展的个体差异。线性回归模型的斜率代表了每个月血液动力学反应的增加。因此，与斜率较小的模型相比，斜率较大的模型预示对人脸的血液动力学反应会有更大的增加。线性回归模型的截距

Frontal condition



Profile condition

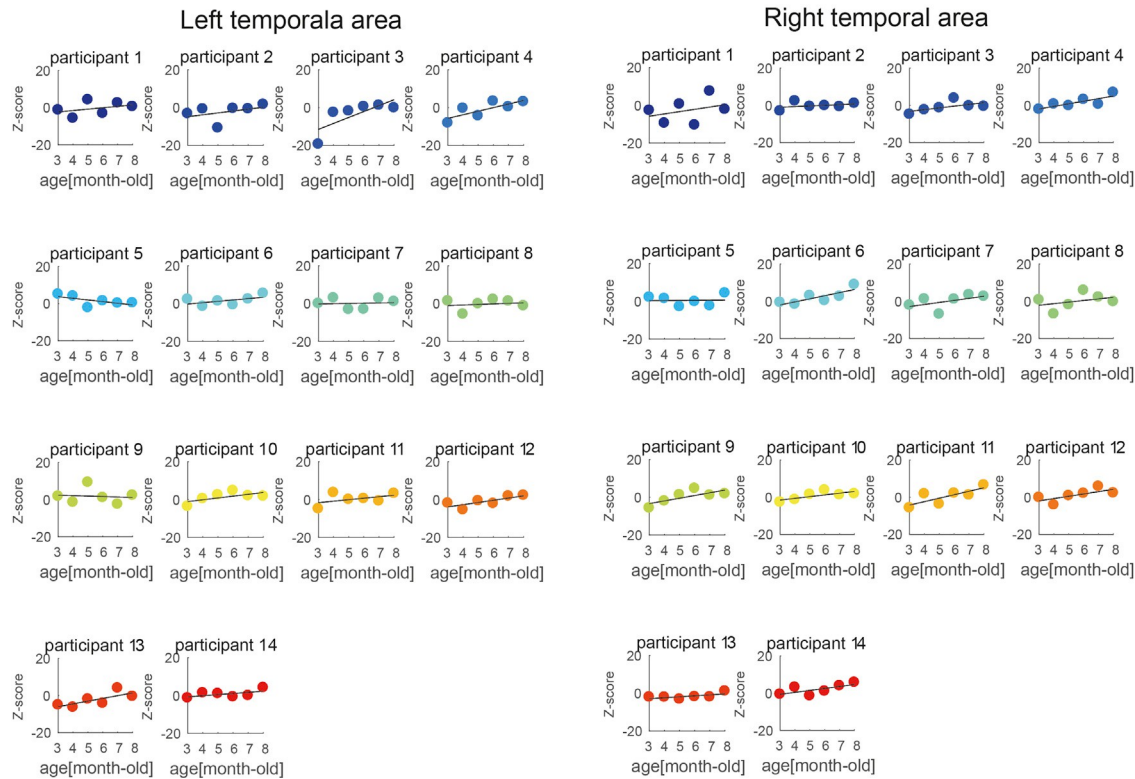


图 2.每位参与者在 3-8 个月大时的血氧浓度 Z 值。单个图表与每位参与者相对应。纵轴表示 Z 值，横轴表示年龄。

表 2

每位参与者的线性回归模型 $y = ax + b$ 的斜率 (a) 和截距 (b) 的估计值。

议题	斜率						截距(b)					
	左侧			对			左侧			对		
	额叶	概况	$t < p$	额叶	概况	$t < p$	额叶	概况	$t < p$	额叶	概况	$t < p$
1	-0.23	0.76	✓	-1.13	1.21	✓	6.70	-2.33		6.87	-5.78	
2	0.53	1.00	✓	0.38	0.34		1.10	-4.82		2.35	-1.03	
3	-0.39	3.14	✓	-0.40	0.94	✓	2.27	-11.50		3.30	-3.28	
4	1.52	1.90	✓	1.38	1.38		-4.74	-5.70		-2.57	-1.96	✓
5	0.76	-0.89		1.45	0.07		-3.20	3.76	✓	-5.22	0.28	✓
6	0.11	0.72	✓	0.02	1.66	✓	-0.53	-0.23		-0.68	-1.99	
7	-0.89	0.14	✓	-0.63	1.11	✓	4.30	-0.18		5.44	-2.85	
8	-0.34	0.29	✓	-0.07	0.86	✓	-0.74	-1.03		-1.56	-2.15	
9	0.94	-0.25		0.96	1.44	✓	-4.23	2.40	✓	-1.45	-3.38	
10	-1.39	0.97	✓	-0.94	0.93	✓	4.59	-1.08		4.48	-1.52	
11	0.54	0.79	✓	0.65	1.87	✓	0.65	-1.64		0.41	-4.25	
12	0.10	1.18	✓	0.28	1.24	✓	-0.16	-3.90		1.25	-1.95	
13	0.02	1.48	✓	0.44	0.50	✓	-1.69	-6.00		-1.31	-2.90	
14	-0.14	0.61	✓	0.28	1.05	✓	1.80	-0.72		1.19	-0.58	
平均数	0.08	0.85		0.19	1.04		0.44	-2.36		0.89	-2.38	
s.d	0.75	0.96		0.79	0.50		3.35	3.85		3.35	1.54	

注。复选标记表示 正面条件下模型的斜率或截距值小于剖面条件下的斜率或截距值。

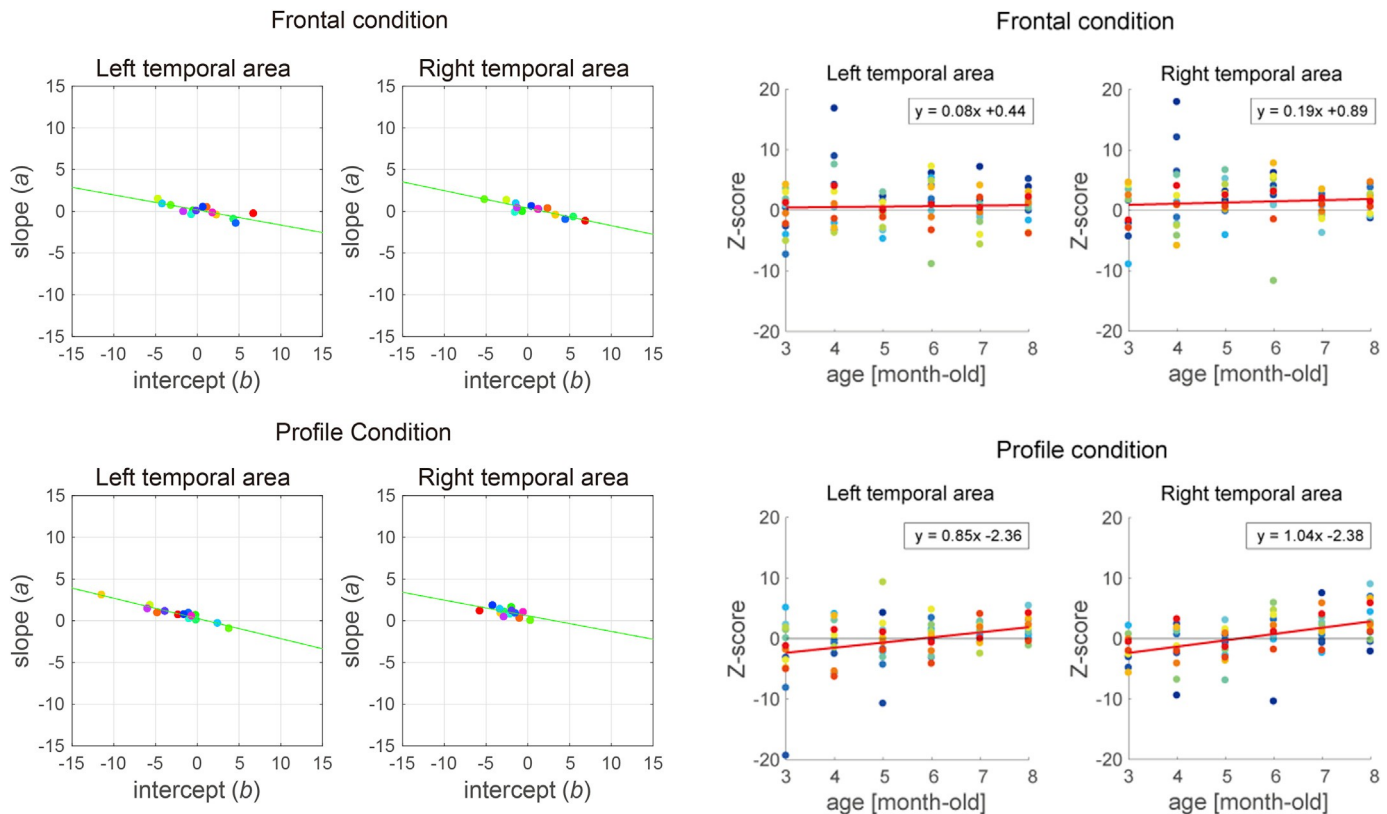


图 3.线性回归模型中斜率和截距参数的散点图。在每幅图中，纵轴表示斜率，横轴表示截距。绿线表示第一个参数分量，它代表了最大的数据方差。每个点代表一名参与者。

下的模型斜率大于正面条件下的模型斜率。这些婴儿的斜率平均值为

代表 3 个月大时对人脸的血液动力学反应。因此，与截距较小的模型相比，截距较大的模型预测的 3 个月大时的血液动力学反应更大。

对每个婴儿进行的线性回归分析表明，大多数婴儿在侧面条件

图 4. 氧-血红蛋白浓度的平均 Z 值与年龄的关系。每个点代表每个年龄段的一个受试者，共绘制了 14 个点。图中每个受试者代表 6 个点。红线代表每个散点图的回归线。

所有婴儿对侧面情境的反应也比对正面情境的反应大。这些结果表明，在婴儿 3 到 8 个月大期间，对侧面人脸的血液动力学反应比对正面人脸的反应增加得更多。对面孔的血液动力学反应随年龄的增长而增加，这意味着氧-血红蛋白反应的增加与成人脑皮层神经元的激活有关，这也得到了以前研究的支持（再观点见 [Lloyd-fox、Blasi 和 Elwell, 2010 年](#)）。我们的纵向

该研究报告指出，8个月大的婴儿（而不是5个月大的婴儿）对轮廓脸有血液动力学反应。

根据我们的线性回归分析，预测婴儿在5个月大左右开始对轮廓面孔进行处理。在线性回归模型中，x-截距代表对人脸的血液动力学反应等于基线值0时的估计时间点。所有婴儿在轮廓条件下的x-截距平均值都大于5个月时的值。这一结果表明，对轮廓面部的处理在婴儿5个月大后才开始出现。这一结果与之前的一项研究（Nakato 等人，2009年）的结果一致，该研究报告称，5个月以上的婴儿对侧面和正面的血液动力学反应会增加。由于5个月大婴儿的视敏度（5个周期/度，十进制视敏度为0.17；Atkinson，2002年）和8个月大婴儿的视敏度（8个周期/度，十进制视敏度为0.27；Atkinson，2002年）在看到脸部轮廓方面相当，因此视敏度的提高不能解释上述结果。我们首先通过纵向测量估计了视图不变的人脸处理出现的发育期。

Y型截距表示血液动力学对剖面的反应。与基线值0（即对蔬菜图像的血液动力学反应）相比，大多数婴儿在3个月大时对人脸图像的双侧血液动力学反应较小。正如之前的研究中所讨论的，与基线值相比，面孔图像的血液动力学反应更大，这表明大脑活动与面孔处理有关。因此，我们的研究结果表明，大多数婴儿在3个月大时并没有将轮廓面孔当作面孔来处理。在正面人脸条件下，大约一半婴儿的截距值小于基线，而另一半婴儿的截距值等于或大于基线。这一结果表明，半数婴儿在3个月大时已将正面人脸图像处理为人脸。Halit 等人（2003年）使用直立和倒立的人脸图像和猴子图像，测量了3、6和12个月大婴儿的人脸反应ERP分量。他们的研究表明，即使是3个月大的婴儿也对人类的直立脸部处理有一定的特化，同时在N290的时间上表现出很大的变异性。与Halit 等人（2003年）的研究结果一致，我们的研究结果也表明，3个月左右的婴儿在处理人脸图像时存在很大的个体差异。

我们的纵向测量结果表明，线性回归模型的参数中出现了个体差异。个体差异同时影响斜率和截距，两者呈负相关。因此，截距较小的模型斜率较大，3个月大时对人脸的血流动力学反应较小的婴儿在3到8个月大期间的血流动力学反应往往增加得更快。个体差异大约在8个月大时趋于一致。虽然我们的研究调查的是面孔处理的个体差异，但以前的行为研究已经证明了物体处理的个体差异，并报告说这种差异与坐或爬等运动能力有关。Schwarzer、Freitag、Buckel 和 Lofruth（2012年）的研究表明，具有爬行能力的9个月大婴儿能学会识别以旋转视图呈现的三维物体，并能从熟悉的物体中分辨出镜像物体。相比之下，不会爬行的同龄婴儿则无法分辨这两个物体。此外，Cashon 等人（2013年）在用脸部刺激对4-8个月大的婴儿进行测试时也发现，坐的能

力会影响婴儿的脸部处理能力。

本研究的局限性如下。我们没有发现左右半球在正面或侧面脸部条件下的血液动力学反应存在差异。这一结果与之前的一项研究（Nakato 等人，2009年）不一致。这

这种差异可能是由于重复测量血液动态反应造成的。据我们所知，目前还没有关于每月重复接触相同实验刺激物 10 分钟的报道。这可能会导致婴儿对面孔的记忆，今后应对此进行研究。Webb 等人（2005 年）也报告说，他们的纵向研究并没有完全重复之前的一项短期研究。

在本研究中，我们调查了婴儿出生后 3-8 个月内人脸处理能力发展的个体差异。据我们所知，我们是首次纵向测量婴儿对人脸的血液动力学反应。我们使用了与之前一项研究（Nakato 等人，2009 年）相同的人脸刺激和 NIRS 测量程序，该研究报告了 5 个月和 8 个月婴儿对轮廓人脸的不同反应。我们的研究表明，婴儿在出生后 8 个月之前就开始对轮廓面孔进行处理。我们还研究了视图不变面孔处理发展过程中的个体差异。轮廓面孔处理的发展速度与 3 个月大婴儿对面孔的血液动力学反应程度成反比。

利益冲突

作者声明，本研究在进行过程中不存在任何可能被视为潜在利益冲突的商业或经济关系。

致谢

本研究得到了创新领域科学研究补助金 "人脸感知与识别 "的支持（文部科学省/日本社会科学省 KAKENHI 补助金编号 JP20119002 给 M. K. Y, JP23119708 给 M. O.）；创新领域科学研究补助金，"跨文化条件下面部-身体研究的构建"（JSPS KAKENHI 补助金号 JP17H06343 给 M. K. Y.）；创新领域科学研究补助金，"稀疏建模"（JSPS KAKENHI 补助金号 JP25120009 给 M. O.、JP26120529 给 H.I.）；科学研究补助金（C）（JSPS KAKENHI 补助金编号 JP24500334 给 E.N.）；青年研究员补助金（B）（JSPS KAKENHI 补助金编号 JP17K12735 给 Y.I.）和 JSPS 研究员补助金（JSPS KAKENHI 补助金编号 JP24-7809 给 H.I.）。感谢 Yuna Inada、Megumi Kobayashi、Yuiko Sakuta、Kazuki Sato、Aki Tsuruhara、Wakayo Yamashita、Yuka Yamazaki 和 Jiale Yang 在数据收集方面提供的帮助。

参考资料

Atkinson, J., 2002. *The Developing Visual Brain*. 牛津大学出版社, 伦敦。

Blasi, A., Lloyd-fox, S., Johnson, M.H., Elwell, C., 2014. 婴儿功能性近红外光谱测试-重测可靠性》。 <https://doi.org/10.1117/1.NPh.1.2.025005>, 025005-1 - 025005-12。

Cashon, C.H., Ha, O.R., Allen, C.L., Barna, A.C., 2013. 婴儿的坐姿能力与直立面孔加工之间的 U 型关系。 *儿童发展*, 84, 802-809. <https://doi.org/10.1111/cdev.12024>。

de Haan, M., Pascalis, O., Johnson, M.H., 2002. 人类婴儿人脸识别神经机制的专业化。 *J. Cognit. Neurosci.* 14 (2), 199-209. <https://doi.org/10.1162/089892902317236849>。

Fagan, J.F., 1976. 婴儿对人脸不变特征的识别。 *Child Dev.* 47 (3), 627-638. <https://doi.org/10.2307/1128177>。

Franceschini, M.A., Thaker, S., Themelis, G., Krishnamoorthy, K.K., Boddy, B., 2011. 用频域近红外光谱评估婴儿大脑发育。 *Pediatr.* 61 (5), 546-551. <https://doi.org/10.1203/pdr.0b013e318045be99>。

Halit, H., de Haan, M., Johnson, M.H., 2003. 脸部处理的皮层特化：3 个月和 12 个月婴儿的脸部敏感事件相关电位成分》（Cortical specialisation for face processing? *NeuroImage* 19, 1180-1193. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00076-4)。

Honda, Y., Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Kojima, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2010. 婴儿如何感知乱码脸：近红外光谱研究》（How do infants perceive scrambled face? *Brain Res.* 1308, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.10.046>。

Ichikawa, H., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2010. 通过近红外光谱（NIRS）测量婴儿观看点光源显示器面部运动时的大脑活动。 *Neurosci. Lett.* 482 (2), 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.06.086>。

- Ichikawa, H., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2013.眼睛对比度反转会损害婴儿的面部处理：一项近红外光谱研究。Neuropsychologia 51 (13), 2556-2561. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.020>。
- Jasper, H.H., 1958.国际联合会的10-20电极系统。脑电图Clin.10, 371-375.
- Johnson, M.H., Morton, J., 1991.人类婴儿中的 Conspec 和 Conlern. In: Johnson, M.H., Morton, J. (Eds.), Biology and Cognitive Development: the Case of Face Recognition. Basil Blackwell, Oxford, England, pp.Basil Blackwell, Oxford, England, pp.
- Kanwisher, N., McDermott, J., Chun, M.M., 1997.纺锤形面孔区：人类视觉皮层中专门用于面孔感知的模块。J. Neurosci.17 (11), 4302-4311.
- Kanwisher, N., Yovel, G., 2006.纺锤形面孔区：专门感知面孔的皮层区域。Philos.Trans. R. Soc. Lond.R. Soc. Lond.B Biol.361 (1476), 2109-2128. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1934>.
- Kobayashi, M., Macchi Cassia, V., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2018.婴儿期对成人面孔的知觉缩小是一种跨文化现象：对日本婴儿的行为和近红外光谱研究。Dev.科学 (1) <https://doi.org/10.1111/desc.12498>.
- Kobayashi, M., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2012.婴儿大脑中脸部的大小不变表征：fNIRS-适应研究。神经报告 23 (17), 984-988. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32835a4b86>.
- Kobayashi, M., Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2011.婴儿会以视点不变的方式表现人脸吗？近红外光谱法测量的神经适应研究。Front.Hum.Neurosci.5, 153. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00153>.
- Lloyd-fox, S., Blasi, A., Elwell, C.E., 2010.照亮发育中的大脑：功能性近红外光谱的过去、现在和未来。Neurosci.Biobehav.Rev. 34, 269-284. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.07.008>.
- Matsuda, G., Hiraki, K., 2006.电子游戏期间儿童背侧前额叶皮层氧合血红蛋白的持续下降：近红外光谱研究》(NIRS)。NeuroImage 29, 706-711. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.019>.
- Moriguchi, Y., Hiraki, K., 2011.幼儿期前额叶功能的纵向发展》(Developmental Cognitive Neuroscience 1 (2), 153-162.<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.12.004>。
- Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Honda, Y., Kakigi, R., 2011a.我认识这张脸吗？：近红外光谱法研究 7 至 8 个月大婴儿感知母亲面孔时的神经活动。Early Hum.早期人类发展》(Early Hum.87 (1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2010.08.030>.
- Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2011b.婴儿对快乐和愤怒面部表情的血液动力学反应模式的明显差异--一项近红外光谱研究。NeuroImage 54 (2), 1600-1606. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.09.021>。
- Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Watanabe, S., Kakigi, R., 2009.婴儿何时区分侧面脸和正面脸？近红外光谱研究。Hum.Brain Mapp.30 (2), 462-472. <https://doi.org/10.1002/hbm.20516>.
- Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Watanabe, S., Kakigi, R., 2007.通过近红外光谱测量婴儿直立和倒立面孔的神经激活。NeuroImage 34, 399-406. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.08.013>。
- Perlman, S.B., Huppert, T.J., Luna, B., 2016.儿童早期至中期前额叶参与工作记忆发展的功能性近红外光谱学证据》(Functional Near-infrared spectroscopy evidence for development of prefrontal engagement in working memory in early through middle childhood.Cerebr.Cortex 26 (6), 2790-2799. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv139>。
- Puce, A., Allison, T., Asgari, M., Gore, J.C., McCarthy, G., 1996.人类视觉皮层对面孔、字符串和纹理的不同敏感性：功能磁共振成像研究。J. Neurosci.16 (16), 5205-5215.
- Rose, S.A., Jankowski, J.J., Feldman, J.F., 2002.7 个月和 12 个月时的处理速度和脸部识别能力。Infancy 3 (4), 435-455. https://doi.org/10.1207/S15327078IN0304_02。
- Schroeter, M.L., Zysset, S., Kruggel, F., von Cramon, D.Y., 2003.通过功能性近红外光谱测量血液动力学反应的年龄依赖性。NeuroImage 19, 555-564. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00155-1)。
- Schwarzer, G., Freitag, C., Buckel, R., Lofruth, A., 2012.爬行与 9 个月大婴儿的心理旋转能力有关。Infancy 18, 432-441. <https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2012.00132.x>。
- Shimada, S., Hiraki, K., 2006.婴儿大脑对现场和电视动作的反应。NeuroImage 32, 930-939. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.03.044>.
- Turati, C., Bulf, H., Simion, F., 2008.新生儿对视角变化的人脸识别。<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.06.005>。
- Webb, S.J., Long, J.D., Nelson, C.A., 2005.出生后第一年视觉事件相关电位的纵向调查。Dev.8 (6), 605-616. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00452.x>.
- Yamashita, W., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Kakigi, R., 2012.凝视方向对婴儿大脑活动中三维人脸识别的影响》(The effect of gaze direction on three-dimensional face recognition in infant brain activity.神经报告 23 (13), 799-803. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32835734a8>.