arXiv:2305.02525v1 [cs.RO] 4 May 2023

设计亲子与机器人互动，促进家长与幼儿在家中的数学对话

Hui-Ru Ho，威斯康星大学麦迪逊分校教育心理学系，美国Nathan White，威斯康星大学麦迪逊分校计算机科学系，美国Edward Hubbard，威斯康星大学麦迪逊分校教育心理学系，美国Bilge Mutlu，威斯康星大学麦迪逊分校计算机科学系，美国

亲子互动对儿童发展至关重要，但家长可能需要在与孩子互动的某些方面获得引导。目前关于教育数学机器人的研究侧重于儿童—机器人交互，却未能充分纳入家长，也未能将家长在儿童学习中发挥的关键作用融入其中。我们探讨如何设计教育机器人以促进亲子对话，重点关注数学对话，因为它能够预测儿童日后的数学能力。我们为社交机器人开发原型功能，通过阅读和游戏活动支持数学对话，并开展了一项探索性的绿野仙踪法家庭实地研究，考察机器人辅助下的亲子互动。研究结果揭示了家长如何受到机器人提示的启发、他们期望机器人采用的交互风格与方法，以及他们希望如何将机器人纳入活动中，并据此提出了教育情境中亲子机器人互动的设计指南。

CCS概念：• **应用计算 → 交互式学习环境**; **•以人为中心的计算 → 实地研究** **s**.

附加关键词和短语：亲子机器人互动；教育机器人；数学对话；家庭数学学习环境

ACM 参考格式：

Hui-RuHo、Nathan White、Edward Hubbard 和 BilgeMutlu。2023。设计亲子机器人互动，以促进家长与幼儿在家中的数学对话。载于交互设计与儿童（*IDC '23*），*2023*年*6*月*19*日至*23*日，美国伊利诺伊州芝加哥。 ACM，美国纽约，18页。https://doi.org/10.1145/3585088.3589358

1 引言

既有研究表明，数学能力与读写能力同等重要，能够预测个体之后的教育成就和职业成就 [44]。在接受正式学前教育之前，父母在非正式学习活动中发挥着关键作用，因为建设性的亲子互动能够促进幼儿的情感和认知发展，包括数学技能的发展 [22, 26, 35, 52, 54]。这种亲子互动包含一个源自教育心理学的概念，即数学对话，指父母或照护者在与儿童的日常对话中自然而然地融入数学语言、运算或概念。例如，在用餐时，父母可能会告诉儿童“拿两个苹果”，让儿童给他们“更多饼干”，或者仅仅通过提问“你看到了多少个热狗？”来提示儿童。父母的数学对话能够让儿童在日常生活情境中运用数学理解能力进行更高级的思考，并且能够预测幼儿日后的数学成就 [17, 18, 24, 36, 52]。然而，由于人口统计特征和社会经济地位（SES）的差异，并非所有儿童都有机会与父母进行高质量数学谈话 [14]。

允许出于个人或课堂用途免费制作本作品全部或部分内容的数字或纸质副本，前提是不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本须附有本声明及首页的完整引文。对于本作品中由作者以外的其他人拥有版权的部分，必须尊重其版权。注明出处后，允许摘录。以其他方式复制、再版、发布至服务器或分发至列表，均须事先获得明确许可和／或支付费用。请向 permissions@acm.org 申请许可。© 2023 版权所有归所有者／作者所有。出版权已授权给 ACM。手稿已提交至 ACM



图 1。在本文中，我们探讨家庭如何与旨在提示家长参与数学导向讨论的社交机器人互动。家庭在自己的家中阅读并与机器人进行自由游戏。在这些活动中，机器人会提供与活动相关的数学导向提示，以促进家庭讨论。我们探讨父母对机器人的认知，并研究机器人如何影响围绕数学概念展开的亲子讨论。

父母可能需要引导，才能将数学对话融入与儿童的互动中 [25], ，而社交机器人有潜力帮助他们做到这一点。由于育儿资源有限，以及每个人在学习过程中都需要个性化支持等多种因素，社交机器人在教育领域的应用日益广泛 [2]。通过促进身体和社会层面的情境学习，社交机器人能够比平板电脑和智能手机等现有技术更有效地支持学习 [56]。既有研究探索了社交机器人在支持性教育角色中的应用，例如担任辅导教师、助教或同伴，以此扩展儿童获得教育机会和资源的途径 [2, 8]。过去的研究还探索了将社交机器人作为教育技术应用于家庭等非正式学习环境中，充当阅读伴侣 [40, 41] 和作业辅导员 [3]。这些研究强调了在设计此类系统时仔细考虑相关社会动态的重要性，例如父母参与教育活动的情况 [10, 47]。这些研究主要聚焦于儿童与机器人的二元互动，但还应开展更多研究，考察社交机器人如何也能增强父母参与儿童教育活动的程度。优化社交机器人干预以支持父母开展儿童数学学习，可能会对促进教育体验和教育成果产生深远影响。

本文探讨了在围绕数学对话的亲子机器人互动情境中，机器人所发挥的作用，以提出设计启示，说明社交机器人如何支持父母参与幼儿的学习体验。在这项研究中，我们邀请由一名四岁儿童组成的亲子二元组，与一款旨在促进数学对话的社交机器人开展阅读和游戏活动。我们呈现了对活动环节录音进行定性分析的结果，以及活动结束后对父母的访谈结果，内容涉及他们在互动中的体验。本研究以教育心理学和儿童—机器人交互领域的学术文献为基础，旨在回答以下问题：

(1) 研究问题1： 家长如何看待机器人引导的数学对话阅读和游戏活动？ **(2) 研究问题2：** 我们应如何设计机器人，以促进亲子与机器人互动中的教育性对话？

我们的探索性研究在两个主要方面为现有研究作出了贡献：（1）更深入地了解社交机器人参与家庭非正式学习活动时，如何影响父母以及亲子关系中的对话；（2）为亲子机器人互动情境中的教育机器人制定一套设计指南。

2 相关研究

2.1 数学对话

在儿童早期的家庭数学环境中，父母的参与对儿童的数学发展起着至关重要的作用 [4, 16, 26]。我们知道，儿童在幼年时期接触数学语言，会对其整体数学能力产生积极影响 [45],；而他们进行数学对话的程度，则可以预测他们对数词基数含义的理解 [36]。因此，父母可以通过参与不同类型的活动（如数字棋盘游戏），并在与儿童的对话中融入数学概念，来支持儿童在家中的数学学习。在家庭活动中融入数学概念的做法称为数学对话。以往研究表明，儿童在日常生活中参与有父母陪伴的数学活动的频率，可以预测他们在早期数学能力标准化测试中的表现 [5]。此外，游戏活动也为亲子双方提供了愉快的机会，让他们进行更多数学对话 [18]。

先前研究表明，家长在家中为儿童提供的数学输入在数量和质量上存在差异，导致儿童早期数学表现有所不同 [17, 19, 53]。家长对于数学对幼儿有多重要有着不同的看法，也会对自己数学能力有多强或有多喜欢数学做出不同的主观判断。家长的数值估算能力和主观数学能力与他们的数学对话相关 [19], , 他们的态度也会影响提供有效数学对话的能力 [15]。

除了家长自身的特质外，数学对话内容的难度也会影响儿童学习 [20, 21, 24]。一项研究考察了幼儿园教师所教授的数学内容，发现花费时间教授高阶数学内容与学习效果呈正相关，而花费时间教授基础内容则呈负相关，这表明大多数幼儿园儿童都能从接触高阶数学内容中受益 [21]。另一项研究表明，与涉及较小数字集合的数学对话相比，涉及较大数字集合的数学对话更能预测儿童的基数知识水平 [24]。然而，并非所有家长都认识到讨论高阶内容的重要性，因此，机器人可以通过引导家长关注与高阶数学概念相关的环境或情境特征来为他们提供帮助。

2.2 教育中的社交机器人

先前研究表明，社交机器人能够积极辅助学校中的语言 [23, 30, 31, 43],科学 [13, 49], 和数学概念 [6, 38, 46]学习。同样，大量证据表明，家庭中的非正式学习陪伴机器人有助于儿童的阅读 [40, 41], 理解 [58], 和数学技能 [11]。社交机器人可以凭借多种能力支持儿童学习，例如口头交流 [7], 自适应辅助 [46], 和社交互动 [33, 56]。Brown 和 Howard [7] 比较了有机器人和无机器人辅助的学习情况；该机器人会提供口头评论。研究发现，基于机器人的学习中，口头提示提高了学生的参与度，并减少了数学学习中的厌倦感。Ramachandran 等人 [46] 证明，数学辅导机器人可以调整辅助方式，更好地满足每个人的需求，从而提升四年级学生的学习成效。研究还表明，社交机器人能够提升学业表现、用户动机和对主题的兴趣 [6, 38] ，并带来社交方面的益处；与其他媒介相比，它们能更好地吸引儿童。Westlund 等人 [56]比较了儿童在语言学习中对三种不同交流对象（人类、机器人和平板电脑）的态度。结果显示，儿童明显更偏好机器人而非平板电脑，将其视为“某个人”而不是“某个东西”，这表明儿童在学习过程中会留意社交线索。这些结果表明，在正式和非正式教育中，儿童都能受益于社交机器人所具备的独特特性。

教育机器人可以通过多种方式与儿童互动，互动对象既可以是个人，也可以是群体，涉及不同数量和类型的人。许多关于教育机器人的研究都聚焦于家庭学习环境中的单个儿童与机器人之间的 互动。例如，Michaelis 和 Mutlu [40] 指出，社交机器人可以帮助一名儿童（10 至 12 岁）在家保持规律的阅读活动，同时将这一体验转变为一种社交活动；Brown 和 Howard [6] 则证明，与机器人进行社交互动有助于提升儿童在平板电脑代数测试中的表现。这些研究揭示了社交机器人在家庭教育中的潜在支持作用，尤其是在围绕二元儿童—机器人交互设计展开的方面。其他一些研究探讨了多个儿童如何与单个机器人互动。Strohkorb 等人 [51] 考察了涉及社交机器人的儿童群体中的社会支配性，并提出了一种利用非行为特征对社会支配级别进行分类的新模型。另一方面，Leite 等人 [34] 研究了多个机器人如何在故事讲述场景中与单个儿童互动，发现让多个机器人参与其中有益于儿童的社会发展。还有一些研究（数量相对较少）涉及亲子二元组 与机器人互动，从而形成三元社交动态。Ho 等人 [28] 通过一款棋盘游戏，探索了在家长陪伴和支持下，机器人如何帮助幼儿进行数学学习。这项研究主要分析了机器人不同提示的优缺点，并未聚焦于亲子机器人互动的设计。另一项研究专门探讨了在编程教育 [47], 领域中，父母如何借助机器人支持幼儿的学习体验，但重点在于阐明父母的策略，而非揭示机器人在三元交互中的设计空间。

近期的研究已开始探讨亲子机器人互动，但其中很少有研究关注机器人如何影响家长与学龄前儿童之间的家庭数学对话，以及在将旨在参与数学对话的社交机器人引入家庭环境时，需要考虑哪些因素。以往研究表明，家长的背景和参与程度会影响儿童与机器人互动的体验 [39]，而机器人能够改善一般性的亲子对话 [9]。此外，Chen 等人 [10] 通过开展多次纵向共同阅读活动，探索了亲子机器人互动设计，并为机器人辅助的亲子互动提出了设计指南，同时为技术设计中的长期体验知识提供了见解。然而，关于家长和儿童如何看待家庭数学导向机器人的角色、机器人在参与多人活动时应如何参与并开展互动，以及在每项活动中应采用何种主要互动模式等问题，目前尚未得到充分探索。

3 方法

为弥补教育与人机互动（HRI）相关文献中的知识空白，我们开展了一项探索性家庭实地研究，让父母与儿童和机器人共同参与活动，以了解社交机器人如何在共同活动期间促进以数学为重点的亲子讨论，以及父母对机器人及其协助的看法。

这项探索性研究是更大规模研究工作的一部分，旨在确定这一教育干预措施的即时和长期效果。该研究将比较机器人辅助的数学对话与自然发生的数学对话，并研究在使用机器人一段时间后，该干预措施所产生的持续影响。本文重点对一小部分参与者的数据进行定性分析。这些参与者参与了一项组间研究，其中部分家庭参与阅读和游戏活动，另一部分家庭则借助机器人开展这些活动。我们仅呈现与机器人互动的参与者的数据，以初步建立对家庭与机器人之间互动及其对机器人感知的定性认识。未来，我们计划在收集更多数据后，对两个组的数据进行比较分析。

表1. 参与者人口统计信息

ID	儿童年龄	儿童性别-der	家长性别-der	儿童母亲的教育程度tion	家庭收入级别
R1	4年2个月	Male	女性	博士学位	20万美元或以上
R2	4年8个月	Male	Male	学士学位	20万美元或以上
R3	4岁6个月	女性	女性	博士学位	150,000–199,999 美元
R4	5 年	Male	女性	上过一些大学，但不到1年	150,000–199,999美元
R5	5年	Male	女性	Some high 学校修过课程或以下	15,000至24,999美元
R6	4年4个月	Male	女性	博士学位	20万美元或以上
R7	4年8个月	Male	女性	博士学位	$150,000-$199,999
R8	4年3个月	Male	Male	硕士学位	20万美元或以上
R9	4年2个月	女性	女性	硕士学位	50,000–74,999美元

3.1 参与者

我们的分析包括来自9个家庭的数据，这些家庭中的儿童年龄在4至5岁之间。选择这一年龄组是因为这是儿童开始熟悉基本数学概念的时期 [37]。这些家庭通过大学员工邮件列表分发的电子邮件招募。每次研究试验都由一位家长和一名儿童参与，尽管偶尔会有其他父母和兄弟姐妹在附近，但他们没有参与活动。参与者人口统计信息列于表1中。每个家庭在研究完成时获得15美元作为补偿。

3.2 研究设计

为了了解家长如何看待旨在促进他们与儿童进行数学对话的机器人，我们请家庭参与两项活动——一项阅读活动和一项结构化自由游戏 活动，期间社交机器人会提供与数学对话相关的提示。所有研究活动均在参与者家中进行，以便观察自然环境中的亲子互动。两项活动的顺序在所有参与者之间进行了平衡。

3.3 研究设置

研究材料包括一台摄像机、一台录音设备、用于亲子活动的材料（即两本故事书和一套仿真食物玩具）、一台 Misty II 社交机器人 [1]，以及我们编写的“热身”手册，用于帮助家庭熟悉如何与机器人互动。摄像机放置在能够拍摄家长、儿童与所有研究材料之间互动的位置。录音设备和其余材料放在家长和儿童附近的地板上。机器人放置在家长和儿童前方，如图1所示。实验人员坐在摄像机拍摄范围之外，负责记录笔记并操作机器人。

3.3.1 交互设计。 Misty II 是一种半人形机器人，其面部配有一个 4 英寸液晶显示屏，可显示可定制的面部表情和动画。在阅读和自由玩耍活动期间，机器人向儿童提供口头提示和问题，并配合旨在提高参与度的面部表情。机器人的语音使用谷歌的云端文本转语音引擎生成[2]。儿童通过以下方式与机器人互动：

[1]https://www.mistyrobotics.com/products/misty-ii/ [2] https://cloud.google.com/text-to-speech/

表2。 阅读和自由玩耍活动的机器人提示示例。每条机器人提示均针对一个数学概念 .

数学对话概念	阅读活动示例	自由游戏活动示例
基数	我觉得 Rosie 向前走了五步。 在家中。	我们有多少个甜甜圈?
数值比较	树上有好多梨。Do 你认为狐狸能吃比.....更多的梨吗? Rosie 做什么?	我们是香蕉多还是披萨多?
加法	我认为，如果再来五只青蛙的话。 绕到池塘边，就会有七只 只青蛙。	加法会如何改变 你盘子里冰淇淋的数量?
减法	我想知道那两只青蛙是不是跳走了 然后鸟飞走了，还剩下多少只动物 会留在池塘周围吗?	进食如何改变.....的数量 你盘子里的冰淇淋呢?
空间语言	Rosie 仍然在狐狸面前，现在 她甚至从山羊旁边走了过去。	薯条在包装袋里面还是外面?

在阅读活动期间将 April Tags[3] 展示在书籍上，在自由游戏活动期间放置塑料食物道具，或按下机器人底座前方两个角落中的一个保险杠按钮。重复 保险杠按钮允许家庭表示希望机器人重复之前的提示。是 保险杠按钮在每项活动中发挥不同的作用。在阅读活动中，它允许家庭确认所选书籍；而在自由游戏活动中，它允许家庭控制机器人何时可以提供提示。

3.3.2 评论设计。 对于自由游戏和阅读活动，我们为机器人设计了针对若干数学对话概念的提示，示例见表2。这些概念由基础到高级依次包括空间语言、基数、数值比较、加法和减法，它们都与数学技能发展相关 [27, 29, 32, 42, 48, 57]。之所以选择这些概念，是因为它们是以往研究中常见的数学对话主题[18, 36, 45, 50, 52], ，并且对于我们的目标年龄组（4–5岁）而言，涵盖了难度各异的数学概念。关于基数的提示聚焦于活动中的具体数量，例如数一数页面上出现的物品数量，或放在盘子里的食物数量。数值比较提示旨在引导讨论两个或多个数值之间的比较，例如某个数量是否比另一个多、少或相等。加法和减法提示旨在引导讨论两个数量的相加或相减。最后，空间语言提示旨在引导讨论多个物体之间的空间关系，例如一个物体是否在另一个物体前面。每个概念的提示都采用机器人陈述或提问的形式，目的是促使家长与儿童围绕该概念展开讨论。

3.3.3 研究活动。 我们设计了两项活动——阅读和自由游戏，为家长提供了充足的机会，让他们以自然的方式与儿童进行数学对话。选择这两项活动，是因为它们曾被用作先前研究儿童数学概念发展时的研究任务 [19, 45, 55]；它们是常见的亲子活动，家长可能会在其中进行数学对话；而且它们有助于亲子围绕数学概念展开讨论，例如通过数数、加法和减法，讨论书籍中的物品或玩具套装中的物品。活动的顺序

[3]https://april.eecs.umich.edu/software/apriltag

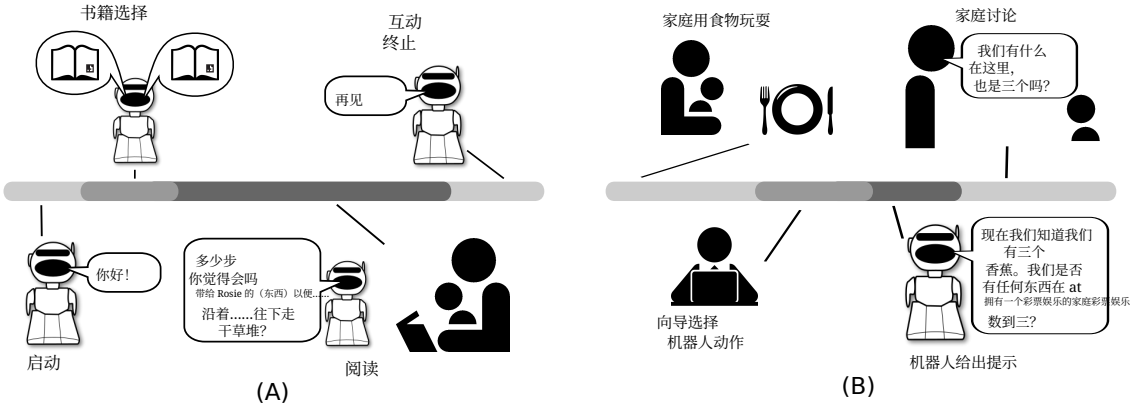


图 2。（A）阅读活动时间线。机器人启动后，会提示用户选择一本书，然后在整个阅读活动中给出评论。（B）自由游戏活动时间线。家庭成员与玩具食物进行游戏时，向导会为机器人选择动作并提供提示。在这两种情境中，机器人都会提出问题或陈述，以促进家庭讨论，家长和儿童可以据此展开进一步讨论。

在参与者之间进行了平衡安排。每项活动开始前，家庭都会阅读两本简短的"热身"手册，了解如何与Misty机器人互动，并练习互动方式。手册中包含引导活动，带领家庭了解如何向机器人展示April Tags，以及如何使用碰撞条回答机器人的问题，或提示机器人重复之前说过的话。

阅读活动。 在阅读活动中，研究人员邀请家庭选择阅读《皮特猫去超市》[4]或《小兔罗西》[5]。研究人员鼓励家长在阅读过程中与儿童讨论任何自然而然想到的内容，但并未要求他们进行数学对话。

书籍的每一页都添加了 April Tags。这些 April Tags 使机器人能够自主识别当前页面，并给出适当的提示，旨在引发家长与儿童之间的数学对话。阅读前，研究人员告知家长，与机器人的互动方式将类似于他们使用热身小册子完成的引导活动。研究人员还告知家长，在阅读活动期间，他们可以随时向机器人展示 April Tags，从而让家长找到合适的时机让机器人发言，而不打断亲子讨论或阅读本身。

互动开始时，机器人询问家庭想读哪本书。选好书后，机器人请家庭开始阅读，并等待家庭向它展示标签。一旦机器人检测到标签，就会为检测到的页面选择合适的提示，并将提示提供给家庭，以引导他们进行数学对话。图2（A）展示了设计的活动时间线，表2列出了评论示例。

自由游戏活动。 自由游戏活动采用绿野仙踪式实验（WoZ）的方式进行，由家长和儿童一起用塑料食物享用一顿假想餐食。研究鼓励家长在游戏过程中讨论任何想到的内容，或对这些内容加以延伸，但没有明确要求他们进行数学对话。该活动设计时长约为20分钟。研究人员告知家庭，他们可以一起准备并分享一顿餐食，也可以随心所欲地用这些食物进行游戏。

[4]James Dean，HarperCollins，2019[5]
Pat Hutchins，Little Simon，2015

儿童和家长在机器人的引导下共同进行假想餐食活动，依次（1）为餐食挑选食物；（2）分配食物；（3）添加并分配更多食物；以及（4）最后假装吃掉食物。在活动的每个阶段，机器人都会提示家庭进行不同形式的数学对话。阶段（1）和（2）侧重于基数和数值比较。阶段（3）侧重于加法，阶段（4）侧重于减法。表2列出了各概念对应的提示示例。请注意，由于环境具有动态性，且物体摆放位置不固定，绿野仙踪式实验（WoZ）的操作员难以实时作出反应，因此活动未纳入空间语言概念。为引导数学对话，机器人会举手示意自己想发言，然后等待家庭按下是 保险杠，以便机器人给出提示。这样的行为设计旨在让家庭自行决定何时与机器人互动，避免觉得机器人打断了他们。该活动的每个阶段约持续五分钟。每个五分钟时段结束时，机器人会举手询问他们是否准备好进入下一阶段。如果用户选择结束当前阶段，机器人便会指引他们进行活动的下一阶段；否则，机器人会给用户更多时间完成当前阶段，之后再询问。

在整个活动过程中，向导会控制机器人举手的时机，以及家庭与机器人互动时机器人提出的问题。向导还会辨认家庭互动过的不同塑料食物及每种物品的数量。图 2（B）展示了自由游戏活动的简化时间线。

3.4 研究流程

在我们前往参与家庭的住所之前，我们告知父母，研究期间他们需要坐在地板上，并请他们腾出一块空间。抵达后，实验人员架设了研究所需的录音录像设备、准备好研究活动，并设置机器人。准备工作完成后，实验人员简要介绍了研究内容并取得知情同意：父母填写同意书，儿童则口头表示同意。随后，家庭完成了由两本热身小册子引导的活动以及两项研究活动。最后，父母参加半结构式访谈，分享他们的体验，填写人口统计问卷，领取参与报酬，并在付款记录表上签字。每次研究总时长约为 60 分钟，其中两项活动约占 40 分钟，之后进行 20 分钟的访谈。

3.5 数据分析

为确保匿名，我们为每个参与的家庭分配了一个 ID，以表示其参与研究的顺序。例如，R1 指第一位参与者。

根据 Clark 和 Braun [12]，提出的指南，我们对半结构式访谈进行了主题分析（TA），以分析父母对机器人以及家庭与机器人互动的看法。我们的主题分析分为五个阶段。首先，第一作者和第二作者根据音视频录制资料转录数据，并熟悉数据。其次，第一作者根据自己对数据的解读编制了初始编码手册。第三，第一作者和另一位经验丰富的定性编码员使用初始编码手册对 R6 的数据进行编码，以评估并建立评定者间一致性。第四，我们比较了两组编码，讨论了其中的差异，并按需调整编码手册。两位编码员分别使用修订后的编码手册对 R3 的数据进行编码，所得评定者间信度为 85%。最后，第一作者和独立编码员完成其余数据的编码后，第一作者和第二作者提炼、审查并最终确定了各主题的名称。

表3. 主题分析结果摘要。

主题分析摘要
主题1：家长指出，机器人拓宽了他们对如何开展数学对话的认识 • 机器人为家长提供了如何在亲子活动中融入数学对话的思路 • 机器人为家长提供了可以向儿童询问哪些类型的数学对话概念的思路
主题2： 父母认为机器人应扮演不同的角色，并更希望它能独立与孩子游戏。 儿童 • 父母更希望机器人改为独立地与儿童互动。 • 父母将机器人视为教师、玩伴和促进者
主题3：父母希望能够掌控互动过程 • 父母对机器人如何开启每次互动有不同的偏好 • 父母希望能更自主地控制机器人何时提供提示

4 结果

在本节中，我们呈现对家长半结构化访谈进行主题分析后归纳出的三个主题。我们发现：（1）家长指出，机器人拓展了他们对如何开展数学对话的认识；（2）家长认为机器人可以扮演不同角色，并更希望机器人能够独立地与儿童游戏；（3）家长希望掌控互动。这些主题总结见表3。

4.1 主题一：家长指出，机器人拓宽了他们对如何开展数学对话的认识

家长从机器人身上学习。所有家长（R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R8、R9）都积极表示，机器人为他们提供了与儿童讨论的话题，以及如何将这些讨论融入与儿童的其他互动中。R1指出，机器人“提出了许多有趣的观点”，而且“有这些提示问题，促使我们展开讨论，感觉很好”。R1还表示，如果儿童“独自玩，数数之类的内容就不会这么多”。R5补充说，机器人“提出了更难的问题”，这“让家长有机会向儿童解释”新概念。R3觉得，如果没有机器人提供新的提示，在与儿童互动时，他们总会围绕同一本书“问同样的问题”；机器人让他们意识到“我 [R3]可以多问她 [child]一些数学相关问题”，而R3“平时通常不会问”这些问题，因为她发现儿童其实能够理解。R6指出了机器人对家长的益处，说机器人“提供了一种框架”，减轻了他们肩上的一部分认知负荷。R4也表达了类似的想法，说问这类问题“我[R4] 以前从来没想过”，而且他们“以前真没想过，给游戏活动加入教学元素可以这么简单”。

机器人用词选择。几位家长（R1、R2、R5、R8）建议，机器人使用的词语可以对儿童来说更基础、更直白。对于偶尔在基础和高级术语之间切换的需求，说明机器人的用词选择应取决于互动动态。R1举例解释说，他们的儿童可能理解减法 的概念，但“他不知道这个词”，因此R1会通过改说“如果你有四个，拿走一个，还剩几个？”来解释并举例说明。R5也认为 the

机器人提出的问题“对她的孩子来说有点难”，可以更加“简单直接”。另一方面，R5也表示，机器人使用更高级的词汇，激励了他们与孩子进行讨论。R1将机器人的高级术语称为“很好的教学切入点”，并强调，如果机器人继续使用更高级的术语，她觉得自己会倾向于和孩子一起参与这项活动以及与机器人互动。同样，R5回忆说，她曾尝试这样向孩子解释“偶数”：“比如，你有两个这样的东西，那就是偶数。”这表明，机器人能够通过扩展机器人的提示，提供进一步的解释或具体示例，激励家长与孩子展开讨论。我们的研究结果表明，家长希望机器人使用更简单直白的语言，可能是因为他们希望孩子能够独立使用机器人。然而，通过提供更高层次、更高级的术语，机器人能够有效地引导家长与孩子进行数学对话。

总的来说，机器人通过使用更高级的数学对话概念，影响了父母参与活动的程度，帮助父母意识到如何在其他活动中与儿童进行数学对话，并为他们提供了与儿童进行何种数学对话的新思路。

4.2 主题2：父母认为机器人扮演着不同的角色，并更倾向于让它独立陪儿童游戏

家长参与。大多数家长（R1、R2、R3、R4、R5、R6、R8、R9）希望机器人能够独立陪孩子玩，而其中一些家长（R1、R3、R5）表示，他们也希望偶尔参与互动。R2说，他们更希望孩子能独自和机器人玩，这样自己就能“有点空闲时间”。R4也表达了类似的想法，说自己可以告诉孩子：“好啦，我得做晚饭了，你坐下来和你的机器人玩吧。”R6补充说，如果能“找到一个可以教我孩子数学的独立机器人”，那就太好了；它还能“分担一些提出数学问题的责任”。R1说，机器人“多少帮我分担了一点陪玩的事”，并表示他们觉得孩子可以“独自”与机器人玩。不过，R1觉得机器人偶尔会向孩子提出过于超前的概念。虽然他们认为这“是个很好的教学切入点”，但也觉得孩子可能“无法独自完成”。因此，一些家长（R1、R3、R5）表示，他们希望能够“有时大家一起玩”，并且“如果能兼顾”独立游戏和共同游戏两种能力就好了。

机器人的角色。 父母将机器人视为“教师”（R2、R6、R8）、“玩伴”（R1、R4、R5、R9）和“促进者”（R1、R3）。R6将机器人视为数学教师，并表示他们试图“利用 Misty 作为权威人物的存在”来激励儿童回答问题，从而减轻自己“帮助阅读书籍的责任”。同样，R2认为机器人“是在指导事情，而不只是发表评论”。另一方面，R3认为机器人能够向他们提供提示，但不太像一个权威人物，而是补充了他们自身的能力，让他们意识到“哦，对，我可以问 [我的孩子] 这个问题”。R1指出，他们对机器人的角色认知在两项活动之间有所不同：在阅读活动中将机器人描述为促进者，而在自由游戏活动中则将其视为玩伴。

机器人提示。 几位家长注意到，机器人提出问题与发表陈述时，互动有所不同（R4、R6、R8），并提出了他们认为机器人提示可以如何设计的建议（R1、R3、R5、R6、R9）。R4指出，当机器人发表陈述时，“这并没有让他 [家长]真正参与进来”，而问题则带来了“真正的互动，让他参与到问题解决中”。R6补充说，他们认为“这些陈述不需要儿童参与互动”，而作为家长，这些陈述让他觉得自己像是在接受测试。

由机器人提出，仿佛这些陈述“本应确保其准确反映对材料的理解”。关于机器人的提示，R1 建议可以随着儿童年龄的增长调整提示的难度，并表示机器人“会有点像是和你的孩子一起成长”。此外，为了让儿童保持更高的参与度，机器人还可以涵盖读写能力、颜色等其他主题。此外，R3 表示，机器人提供鼓励性反馈很有帮助。她说，她“能看出，当 [机器人] 说‘哦，你真棒’时， [儿童] 很开心”。

总体而言，家长认为机器人的角色应主要是能够独立与儿童互动，同时也希望机器人能够偶尔让家长参与其中。他们还表达了对机器人如何更好地让自己参与对话的偏好，涉及的主题包括提示的形式与多样性、难度级别的变化以及鼓励性反馈。

4.3 主题3：家长希望掌控互动

交互发起方式。 家长对于机器人**发起** 互动的方式表达了三种不同偏好：(1) 家长或儿童发起与机器人的互动（R1、R6）；(2) 机器人未经任何许可发起互动（R2、R3、R4、R6）；(3) 机器人表明其想要发起互动的意图，但等待许可（R1、R2、R3、R5）。一些家长（R1、R6）表示，他们更希望机器人“让儿童主动按下按钮来获取问题”，因为他们希望能更好地控制何时与机器人互动。其他家长（R2、R3、R4、R6）认为，他们更希望机器人无需任何提示或许可就引出反馈，渴望一种更自然的人与人之间的互动。R3表示，他们希望机器人“能够在没有提示的情况下说话”，而这种来回互动可以“促进他们[儿童与机器人] 之间的关系”。同样，R4描述道，他们“更希望机器人能够未经许可就发表评论，就像人类对话一样”，这可能“比坐在那里等待她 [机器人] 举手更有益”。然而，R6表示，他们更希望能够对机器人何时说话保有某种控制，因为他们不希望机器人“突然毫无征兆地冒出一个问题”。

对于互动控制权的这种需求，在自由游戏活动中得到了更明确的讨论：机器人会举手并等待许可后再说话。一些家长认为，这“让他们可以选择是否参与”（R3、R5），而且机器人举手的行为让儿童保持专注（R1、R2、R3、R5）。一些家长（R1、R2、R5）提到，他们的孩子“在机器人举手后立刻”按下了保险杠，这让孩子感到“兴奋”，或者觉得“很有趣”，并认为这很“有互动性”。然而，R3指出，当机器人不说话时，“更难让她 [这个机器人] 参与进来”，而且他们知道机器人“无法作出回应”。

提示的频率和时机。 几位家长（R1、R2、R4、R6）指出，机器人的提示<style id='3'>频率 和**时机** 会影响他们在互动中的体验。R1认为，机器人在“阅读时提示得很及时”，而机器人“每隔几页提示一次就足够了”，因为“问太多问题”可能会模糊故事的脉络。不过，R6指出，向机器人展示标签时，感觉像是在“刻意停顿”，以便收到机器人的问题或陈述。R2觉得扫描标签的过程“太慢了”，可能会让儿童“分心”；R4则指出，回应缓慢可能会让“家长不确定”机器人何时会参与活动。R4还解释说，他们感觉自己一直在“等她 [机器人] 举手 [”]„ 但“也不知道那一刻什么时候会到来”。R2还指出，阅读活动感觉结构性更强，因为互动取决于是否展示书中的标签；而在游戏时，他说这“取决于什么吸引了他[儿童] 的注意力”。

表4。基于主题分析得出的三个主题，对居家教育机器人设计建议的总结。

主题	建议	示例
主题 1	家庭教育机器人应设计为一种资源，以有效的方法促进认知思维，帮助父母和儿童提升认知思维，并采用有效的方法。	机器人可以包含更高级的术语在其提供给家长使用并可进一步拓展的提示中进行拓展。
	家庭教育机器人应被设计为通过社交互动示范或展示学习策略。	机器人可以向家长示范如何为复杂的想法提供支架，或提供在在场时给予鼓励进行中的活动。
主题2	家庭教育机器人应当被去-旨在适应不同级别的家长参与。	家长忙碌时，机器人可以独立支持儿童，但也能在家长参与时与其互动，或赋能家长。他们参与其中。
	家庭教育机器人需要能够采取行动并以符合其角色的方式说话机器人的。	如果机器人的角色是提供指导像教师一样，它应该提供更多的结构以及活动中的引导。
主题3	家庭教育机器人必须经过设计使其能够将自身的自主权交由家庭掌控，以满足他们的期望。	如果正在进行对话，机器人可以表达自己想要继续交流的意愿使用非语言提示进行沟通，并等待直到av电影家庭成员明确地让它轮到、】【说话，让他们能够控制何时红黑大战机器人与家庭互动。

总体而言，家长希望能更好地掌控互动，但对于机器人应如何参与活动，以及应作为多么积极的参与者，各有不同偏好。

5 讨论

我们的研究探讨了引入机器人及其交互设计如何塑造围绕数学对话的亲子机器人互动。我们通过阅读和游戏活动，考察了父母对机器人引导的数学对话的认知。我们发现，与机器人的互动拓展了父母对与儿童进行数学对话的认知；父母主要偏好双人儿童—机器人交互，但在参与其中时，希望能更明确地控制机器人及互动。我们的研究结果带来若干启示，包括家庭教育机器人有望在亲子对话中提供协助并示范策略，父母对于这些机器人如何分担其早期教育职责有各自的偏好，以及机器人的互动应优先满足父母对控制权的需求。我们将在下文详细阐述各项启示，并以设计建议作结，具体内容见表4。最后，我们将讨论本研究的局限性及若干未来研究方向。

5.1 机器人促进家长与儿童数学对话体验的认知与社交方法 e

父母一致认为，社交机器人提供的数学对话提示促进了他们与儿童的讨论；若没有机器人，他们可能根本不会想到这些话题。我们由此得出结论，机器人能够协助家长与儿童进行数学

对话，将认知要素引入他们的思考，并为对话推荐话题。在这一情境下，机器人充当了一种认知资源，通过口头提示为家长与儿童讨论提供隐性的教育框架，减轻了家长在与儿童开展数学相关互动时的认知负荷。

此外，家长觉得，通过观察儿童对机器人提供的提示作出积极反应，机器人帮助他们意识到可以采用新的教育策略，将数学对话融入其他互动中。这一观察表明，机器人可能通过社会性学习影响亲子数学对话。社会性学习是源自心理学文献的理论概念，认为当他人采取的某种选择或决定被视为一种能以较低成本实现特定结果的方式时，人们可以通过模仿来学习 [1]。从这一理论视角来看，机器人有可能引导或赋能家长，与儿童开展更具教育成效的互动。因此，社会性学习可能是社交机器人促进亲子互动的关键机制，尤其是考虑到它们的实体存在和类人设计。因此，我们提出以下设计建议：

(1) **家庭教育机器人应被设计为一种资源，通过有效的方法促进父母和儿童的认知思维**。例如，机器人可以在其提示中加入更高级的术语，供家长使用并进一步拓展。(2) **家庭教育机器人应被设计为通过社交互动示范或展示学习策略**。例如，在正在进行的活动中，机器人可以向家长示范如何为复杂的概念提供支架，或给予鼓励。

5.2 机器人的混合交互风格及其在分担家长责任中的感知社会角色

大多数家长希望机器人在设计上能够让儿童独立与其游戏，因为他们想腾出时间处理其他事务，也认为机器人可以分担一些责任。这也反映了家长希望机器人使用更简单、直接的语言。然而，家长偏好的方式未必能让儿童获得最佳的教育效果。以我们在研究中的观察为例，如果机器人使用更基础的概念和语言，家长可能就不会觉得有必要那么积极地参与活动。当机器人使用较为高级或抽象的术语和概念时，便为家长进行数学对话创造了机会，因为家长会因此受到鼓励，向儿童解释并提供例子。基于这一探索性观察，机器人的用词可能会影响家长参与活动的动机，并进一步影响教育活动中家长、儿童与机器人之间的互动形式。虽然尚不清楚机器人的数学对话能否以更有效的方式取代家长的数学对话，但既有研究始终表明，家长早期的数学对话能够预测儿童在学前阶段的数学成就 [17, 18, 24, 36, 52]。我们的长期目标是设计一款机器人，作为一种技术干预手段，促进家长在家中进行数学对话。因此，重要的是考虑儿童与机器人互动的体验是否以及如何能够带来家长行为长期而持久的改变，即使机器人被移除后，这种改变仍能持续。要实现这些改变，家长必须观察机器人示范如何与儿童进行数学对话。

此外，机器人被感知到的角色因家庭而异，并可能通过改变父母对机器人的融入和使用方式，影响亲子机器人互动中的父母社会行为。根据我们的访谈，父母对机器人角色的认知各不相同，有的将其视为促进者，有的视为玩伴，还有的视为教师。玩伴和教师是两种截然不同的角色，这表明，尽管……，父母对机器人的角色仍有不同的认知。

机器人为所有家庭提供了完全相同的互动。一种可能的解释是，父母对机器人的责任有不同的初始预期，这会影响他们对机器人发出提示这一意图的看法。例如，将机器人视为教师的父母会尝试利用其感知到的权威，以有纪律的方式让儿童回答问题，并让机器人承担更多激励儿童的责任。而将机器人视为玩伴的父母则能够以愉快的态度鼓励儿童，并对与“两个孩子”互动承担更多责任。父母对机器人的这些不同看法，可能会极大地影响他们如何向儿童介绍机器人、儿童如何了解机器人是什么，以及他们决定以何种态度对待机器人的提示。因此，在为亲子二元组设计社交机器人时，重要的是考虑机器人角色设计与用户感知之间的一致性。我们提出以下具体建议：

(1) 家庭教育机器人应设计为能够适应父母不同程度的参与。例如，家长忙碌时，机器人可以独立支持儿童；家长参与时，机器人也应能够与家长互动或赋能家长。**(2) 家庭教育机器人应以符合其角色的方式行动和说话**。例如，如果机器人的角色是像教师一样提供指导，就应该为活动提供更多结构和引导。

5.3 机器人在支持个性化互动偏好方面的多层次自主性

在访谈中，家长讨论了机器人提示互动的三种方式——用户控制、自主和示意——每种方式赋予家长或儿童发起互动的控制权各不相同。第一种方式，用户控制，让用户对互动拥有最大的控制权，儿童或家长需要主动提示机器人，才能与之互动。不过，与机器人的互动体验可能不够自然，而且家庭可能更容易停止与采用这种系统的机器人互动。第二种方式，自主，允许机器人完全自主行动，无须直接获得许可即可发起互动。家长认为，自主方式更接近类人交互，也能让他们与机器人建立更亲密的关系。不过，一些家长表示担心会被机器人打扰。最后一种方式，示意，与自主方式类似，但让家庭对何时与机器人互动拥有更多控制权。此方式仍由机器人决定何时发起互动，但机器人会通过举手等方式示意自己想要互动，并等待参与者许可后再进行互动。对于这种互动方式，家长表示，他们喜欢自己可以选择是否让机器人参与；而一旦让机器人参与，机器人的提示行为也能让他们保持投入。不过，正如我们的研究结果所示，示意方式可能让家长难以将机器人纳入活动，因为他们会不确定机器人下一次何时会互动。因此，我们提出了以下设计建议：

(1) 家庭教育机器人必须经过设计，能够以符合家庭期望的方式将自主权交给家庭。例如，机器人可以不打断正在进行的对话，而是通过非语言提示表达自己想要交流，并等待家庭成员明确允许它发言后再开口，让家庭成员掌控机器人何时参与家庭互动。

5.4 局限与未来方向

我们的研究存在一些局限性。首先，研究仅有九名参与者，样本量较小。这是因为本研究具有探索性质，我们选择了家庭实地研究环境，并且难以招募子女年龄范围较窄的家庭。其次，我们通过大学邮件列表招募参与者，因此样本可能受教育程度较高、参与意愿较强。此外，研究在美国开展，并且仅涵盖两种特定情境（即阅读和自由游戏），因此研究结果可能仅适用于某些文化背景和活动。

我们的研究采用绿野仙踪式实验（WoZ）方法，让机器人与家庭共同完成任务。未来还需进一步探索机器人能否以可靠的方式自主进行数学对话，以及自主机器人能否带来相似的结果。我们的初步发现促使我们开发能够促进数学对话的自主机器人系统，并通过长期居家部署研究考察其效果。此类研究将使我们能够在干预前后使用标准化数学评估来衡量儿童数学技能的进步；由于互动时间较短，本研究未纳入此类评估。计划中的这项研究还将探讨长期使用相关问题，以及此类系统能否切实影响父母进行数学对话的习惯，并提升他们将这项技能迁移到不同活动中的能力，使其在没有机器人协助的情况下也能进行数学对话。

6 结论

在本文中，我们探讨了在亲子互动中使用社交机器人促进“数学对话”，以了解社交机器人在三元社交动态中的作用。我们设计了自主阅读 和绿野仙踪式实验（WoZ）自由游戏 活动，在这些活动中，机器人通过一系列经过精心安排时机的提示，促进家长使用数学对话。我们的定性研究结果揭示了家庭如何受到机器人提示的启发；他们期望机器人采用何种互动风格和方法；以及他们希望在互动过程中如何纳入机器人并与其互动。基于这些结果，我们为居家数学主题社交机器人提出了若干设计建议，并为未来研究指出了若干方向。

7 儿童的选择与参与

本研究遵循了一项经威斯康星大学麦迪逊分校机构审查委员会（IRB）审查并批准的伦理方案，方案编号为2020年-1264。方案经审查并获批准后，研究人员通过联系组织邮件列表中的家长招募儿童。在知情同意过程中，实验人员首先解释研究流程，然后让家长填写书面同意书。随后，实验人员向儿童介绍研究并获得其口头同意。在取得儿童的口头同意后，实验人员开始研究。研究人员告知参与者，收集的数据仅会与研究团队成员共享，且任何图片或视频在发表前都会进行匿名化处理。研究人员还告知家长，只有在研究期间确认存在虐待或忽视行为时，实验人员才会打破保密规定。参与者因参加研究获得了 15 美元的补偿。

致谢

我们还要感谢本科生研究助理 Andreea Turcu、Jack Siepmann 和 Abby Andrews 对定性编码过程的支持。

参考文献

[1] Albert Bandura。1962。通过模仿进行社会性学习。（1962）。[2] Tony Belpaeme、James Kennedy、Aditi Ramachandran、Brian Scassellati 和 Fumihide Tanaka。2018。用于教育的社交机器人：综述。Science robotics 3, 21 (2018), eaat5954。[3] Jonnathan Berrezueta-Guzman、Ivan Pau、María-Luisa Martín-Ruiz 和 Nuria Máximo-Bocanegra。2020。支持儿童家庭作业活动的智能家居环境。IEEE Access 8 (2020), 160251–160267。[4] Belinda Blevins-Knabe 和 Ann M Berghout Austin。2016。家庭环境中的幼儿数学技能发展。Springer。[5] Belinda Blevins-Knabe 和 Linda Musun-Miller。1996。儿童及其父母在家中的数字使用及其与早期数学表现的关系。Early Development and Parenting: An International Journal of Research and Practice 5, 1 (1996), 35–45。[6] LaVonda Brown 和 Ayanna M Howard。2013。利用具有社交互动能力的人形机器人让儿童参与数学教育。载于《2013年第13届IEEE-RAS国际人形机器人会议（Humanoids）》。IEEE，183–188。[7] LaVonda N Brown 和 Ayanna M Howard。2014。社交机器人在数学教育中进行言语鼓励的积极效果。载于《2014年IEEE综合STEM教育会议》。IEEE，1–5。[8] Bengisu Cagiltay、Hui-Ru Ho、Joseph E Michaelis 和 Bilge Mutlu。2020。探究家庭对家用机器人的认知和设计偏好。载于《交互设计与儿童会议论文集》。229–242。[9] Meng-Ying Chan、Yi-Hsuan Lin、Long-Fei Lin、Ting-Wei Lin、Wei-Che Hsu、Chia-yu Chang、Rui Liu、Ko-Yu Chang、Min-hua Lin 和 Jane Yung-jen Hsu。2017。WAKEY：改善早晨日常作息，促进亲子沟通。载于《2017年ACM计算机支持的协同工作与社会计算会议论文集》。2287–2299。[10] Huili Chen、Anastasia K Ostrowski、Soo Jung Jang、Cynthia Breazeal 和 Hae Won Park。2022。通过生活化技术体验和访谈，设计在家中的长期亲子机器人三方互动。载于《2022年第31届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）》。IEEE，401–408。[11] Caitlyn Clabaugh、Kartik Mahajan、Shomik Jain、Roxanna Pakkar、David Becerra、Zhonghao Shi、Eric Deng、Rhianna Lee、Gisele Ragusa 和 Maja Matarić。2019。针对自闭症谱系障碍儿童的家用社交辅助机器人的长期个性化。Frontiers in Robotics and AI 6 (2019), 110。[12] Victoria Clarke 和 Virginia Braun。2014。主题分析。载于《Encyclopedia of Critical Psychology》。Springer，1947–1952。[13] Daniel P Davison、Frances M Wijnen、Vicky Charisi、Jan van der Meij、Vanessa Evers 和 Dennis Reidsma。2020。在学校与社交机器人合作：长期真实环境无监督部署。载于《2020年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》。63–72。[14] Eric Dearing、Beth Casey、Pamela E Davis-Kean、Sarah Eason、Elizabeth Gunderson、Susan C Levine、Elida V Laski、Melissa Libertus、Linxi Lu、Caitlin McPherran Lombardi 等。2022。父母数字交流频率的社会经济差异：荟萃分析。Education Sciences 12, 5 (2022), 312。[15] Ann Dowker。2021。家庭数感与学龄前儿童数学发展：父母数学焦虑是否是一个研究不足的因素？载于《Frontiers in Education》，第6卷。Frontiers，2。[16] Greg J Duncan、Chantelle J Dowsett、Amy Claessens、Katherine Magnuson、Aletha C Huston、Pamela Klebanov、Linda S Pagani、Leon Feinstein、Mimi Engel、Jeanne Brooks-Gunn 等。2007。入学准备与后续学业成就。Developmental psychology 43, 6 (2007), 1428。[17] Sarah H Eason、Ariadne E Nelson、Eric Dearing 和 Susan C Levine。2021。促进幼儿在游戏中的数感交流：父母提示的作用。Journal of Experimental Child Psychology 207 (2021), 105124。[18] Sarah H Eason 和 Geetha B Ramani。2020。正式学习和引导式游戏活动中的亲子分数数学交流。Child development 91, 2 (2020), 546–562。[19] Leanne Elliott、Emily J Braham 和 Melissa E Libertus。2017。了解父母与幼儿进行数字交流时个体差异的来源。Journal of Experimental Child Psychology 159 (2017), 1–15。[20] Mimi Engel、Amy Claessens 和 Maida A Finch。2013。教学生他们已经掌握的知识？幼儿园数学教学内容与学生知识之间的（不）匹配。Educational Evaluation and Policy Analysis 35, 2 (2013), 157–178。[21] Mimi Engel、Amy Claessens、Tyler Watts 和 George Farkas。2016。幼儿园数学内容覆盖与学生学习。Educational researcher 45, 5 (2016), 293–300。[22] Claudia Galindo 和 Susan Sonnenschein。2015。缩小社会经济地位数学成绩差距：初始数学能力与家庭学习环境。Contemporary Educational Psychology 43 (2015), 25–38。[23] Goren Gordon、Samuel Spaulding、Jacqueline Kory Westlund、Jin Joo Lee、Luke Plummer、Marayna Martinez、Madhurima Das 和 Cynthia Breazeal。2016。面向儿童第二语言技能的社交机器人导师情感个性化。载于《AAAI人工智能会议论文集》，第30卷。[24] Elizabeth A Gunderson 和 Susan C Levine。2011。某些类型的父母数字交流比其他类型更重要：父母输入与儿童基数知识之间的关系。Developmental science 14, 5 (2011), 1021–1032。[25] Erinn Hanner、Emily J Braham、Leanne Elliott 和 Melissa E Libertus。2019。通过杂货店标识促进成人与儿童互动中的数学对话。Mind, Brain, and Education 13, 2 (2019), 110–118。

[26] Sara A Hart、Colleen M Ganley 和 David J Purpura。2016。了解家庭数学环境及其在预测家长对儿童数学能力的报告中的作用。PloS one 11, 12 (2016), e0168227。[27] Zachary CK Hawes、Katie A Gilligan-Lee 和 Kelly S Mix。2022。空间训练对数学表现的影响：荟萃分析。Developmental Psychology 58, 1 (2022), 112。[28] Hui-Ru Ho、Bengisu Cagiltay、Nathan Thomas White、Edward M Hubbard 和 Bilge Mutlu。2021。RoboMath：设计一款支持儿童数值技能的学习伙伴机器人。载于交互设计与儿童。283–293。[29] Tessa Johnson、Alexander P Burgoyne、Kelly S Mix、Christopher J Young 和 Susan C Levine。2022。空间技能与数学技能：与年龄、社会经济地位和性别相关的异同。Cognition 218 (2022), 104918。[30] Takayuki Kanda、Takayuki Hirano、Daniel Eaton 和 Hiroshi Ishiguro。2004。作为儿童社交伙伴和同伴辅导教师的互动机器人：一项实地试验。Human–Computer Interaction 19, 1-2 (2004), 61–84。[31] James Kennedy、Paul Baxter、Emmanuel Senft 和 Tony Belpaeme。2016。社交机器人辅导儿童学习第二语言。载于2016年第11届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，231–238。[32] Mathieu Le Corre 和 Susan Carey。2007。一、二、三、四，仅此而已：对口头计数原则概念来源的研究。Cognition 105, 2 (2007), 395–438。[33] Christine P Lee、Bengisu Cagiltay 和 Bilge Mutlu。2022。开箱体验：探索并设计儿童与社交机器人之间的初始互动。载于2022年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集。1–14。[34] Iolanda Leite、Marissa McCoy、Monika Lohani、Daniel Ullman、Nicole Salomons、Charlene Stokes、Susan Rivers 和 Brian Scassellati。2015。课堂中的情感故事讲述：儿童与机器人之间的个体互动与群体互动。载于第十届ACM/IEEE人机交互国际会议年会论文集。75–82。[35] Susan C Levine、Kristin R Ratliff、Janellen Huttenlocher 和 Joanna Cannon。2012。早期拼图游戏：预测学龄前儿童空间变换技能的指标。Developmental psychology 48, 2 (2012), 530。[36] Susan C Levine、Linda Whealton Suriyakham、Meredith L Rowe、Janellen Huttenlocher 和 Elizabeth A Gunderson。2010。幼儿数概念的发展中，什么因素最重要？Developmental psychology 46, 5 (2010), 1309。[37] Diana Leyva、Melissa E Libertus 和 Rebecca McGregor。2021。家庭数学活动的子领域与4岁儿童相应数学技能之间的关系。Education Sciences 11, 10 (2021), 594。[38] Edgar Lopez-Caudana、Pedro Ponce、Luis Cervera、Sara Iza 和 Nancy Mazon。2018。用于初中数学教学的机器人平台。International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 12, 4 (2018), 1349–1360。[39] Sam R McHugh、Maureen A Callanan、Kevin Weatherwax、Jennifer L Jipson 和 Leila Takayama。2021。非寻常物件：将家长的STEM背景和儿童对生命性的判断与亲子机器人游戏联系起来。Human Behavior and Emerging Technologies 3, 4 (2021), 525–539。[40] Joseph E Michaelis 和 Bilge Mutlu。2018。社交阅读：借助学习伙伴机器人改变居家阅读体验。Science Robotics 3, 21 (2018), eaat5999。[41] Joseph E Michaelis 和 Bilge Mutlu。2019。社交机器人如何支持人们对科学学习的兴趣。载于第18届ACM交互设计与儿童国际会议论文集。71–82。[42] Kelly S Mix。2019。空间技能为何与数学相关？Child Development Perspectives 13, 2 (2019), 121–126。[43] Seong Ju Park、Jeong Hye Han、Bok Hyun Kang 和 Kyung Chul Shin。2011。英语课堂中的助教机器人ROBOSEM及其推广面临的实际问题。载于先进机器人及其社会影响。IEEE，8–11。[44] Samantha Parsons 和 John Bynner。2005。数感是否更为重要？(2005)。[45] David J Purpura、Amy R Napoli、Elizabeth A Wehrspann 和 Zachary S Gold。2017。数学语言与数学知识之间的因果联系：一项对话式阅读干预研究。Journal of Research on Educational Effectiveness 10, 1 (2017), 116–137。[46] Aditi Ramachandran、Sarah Strohkorb Sebo 和 Brian Scassellati。2019。使用辅助导师 POMDP（AT-POMDP）进行个性化机器人辅导。载于AAAI人工智能会议论文集，第33卷。8050–8057。[47] Emily Relkin、Madhu Govind、Jaclyn Tsiang 和 Marina Bers。2020。家长如何支持儿童通过机器人进行非正式学习。Journal of Research in STEM Education 6, 1 (2020), 39–51。[48] Barbara W Sarnecka 和 Charles E Wright。2013。精确数的概念：儿童对基数和等势的理解。Cognitive science 37, 8 (2013), 1493–1506。[49] Masahiro Shiomi、Takayuki Kanda、Iris Howley、Kotaro Hayashi 和 Norihiro Hagita。2015。社交机器人能否激发课堂中的科学好奇心？International Journal of Social Robotics 7, 5 (2015), 641–652。[50] Seung-Hee Claire Son 和 Jin Hee Hur。2020。家庭烹饪过程中家长的数学对话与启蒙计划儿童的数学技能：任务管理对话的作用。Journal of Research in Childhood Education 34, 3 (2020), 406–426。[51] Sarah Strohkorb、Iolanda Leite、Natalie Warren 和 Brian Scassellati。2015。对儿童在与机器人进行群体互动时的社会支配性进行分类。载于2015年ACM多模态交互国际会议论文集。227–234。[52] Maria Ines Susperreguy 和 Pamela E Davis-Kean。2016。家庭中的母亲数学对话与学龄前儿童的数学技能。Early Education and Development 27, 6 (2016), 841–857。[53] Jyothi Thippana、Leanne Elliott、Sarah Gehman、Klaus Libertus 和 Melissa E Libertus。2020。家长与幼儿进行数数对话的方式：比较方法、家庭因素、活动情境及其与数学技能的关系。Early Childhood Research Quarterly 53 (2020), 249–259。

[54] Maureen Vandermaas-Peeler、Larissa Ferretti 和 Sara Loving。2012。玩瓢虫游戏：家长对幼儿数感活动的指导。*Early Child Developmentand Care* 182, 10 (2012), 1289–1307。[55] Maureen Vandermaas-Peeler、Jackie Nelson、Charity Bumpass 和 Bianca Sassine。2009。共同阅读故事书和游戏中的数感相关交流。*InternationalJournalof EarlyYearsEducation* 17, 1 (2009), 67–84。[56] J Kory Westlund、Leah Dickens、Sooyeon Jeong、Paul Harris、David DeSteno 和 Cynthia Breazeal。2015。比较儿童从机器人、平板电脑和人类那里学习新词的情况。载于第一届社交机器人在治疗与教育中的应用国际会议论文集。[57] Karen Wynn。1992。儿童对数词和计数系统的习得。认知心理学 24, 2 (1992), 220–251。[58] Hsiu-Ping Yueh、Weijane Lin、S-Chen Wang 和 Li-Chen Fu。2020。图书馆读写活动中与机器人和人类伙伴共同阅读：一项比较研究。*British JournalofEducationalTechnology* 51, 5 (2020), 1884–1900。