用于检测自闭症谱系障碍新兴说话者指令性运动反应中的原创作者身份与认知努力的运动特征

（谨献给 *Anne M. Donnellan，1943—2024*年）

生命中没有什么值得恐惧，只有需要理解。现在正是加深理解的时候，这样我们就能减少恐惧。——玛丽·居里

Elizabeth B Torres[1,2,3]

[1]感觉运动整合实验室，心理学系，新泽西州立罗格斯大学，新不伦瑞克，新泽西州，美国

[2]罗格斯大学认知科学中心，新泽西州立罗格斯大学，新不伦瑞克，新泽西州，美国

[3]新泽西州立罗格斯大学生物医学成像与建模中心、计算机科学系，美国新泽西州新不伦瑞克

*** 通信作者：** Elizabeth
B Torres
ebtorres@rutgers.edu

关键词：辅助打字，生物力学，非言语者，自闭症，运动控制，二元能动性，Fisher-Rao距离度量，随机分析

摘要

目前，对于依靠辅助打字进行交流的非言语者，还没有客观且不预设立场的方法来追踪其信息作者身份和能动性的程度。问题的一部分在于，打字者自发手势动作中的细微变化，大多发生在打字者和沟通调节伙伴都未察觉的情况下。这些自发动作与产生打出信息的有意动作同时发生，但目前尚未被视为沟通系统的一部分。我们介绍了一种测定方法，可在生态效度环境中探查不同程度的认知负荷。随后，我们与一位新兴言语者兼打字者及其沟通调节伙伴合作，经验性地估算其在独立打字和辅助打字过程中的运动随机特征。在不同程度的认知负荷下，这种测定方法和生物特征指标能够区分两类运动模式：一类是在回应开放式问题时自发打出短语，另一类是按照指令打出相同短语。与优势侧（打字侧）同时发生的非优势侧身体动作，不仅揭示了打字者的认知努力和能动性程度，还通过仅在开放式模式中出现的运动性前奏，揭示了其创造性思维程度。这种语义作者身份的程度，既可从表示动作波动的伽马随机参数的流形上的测地线路径中检测出来，也可从物理三维空间轨迹中检测出来。头部和面部微动作捕捉到了这些非优势侧身体动作的细微特征，从而提供了一种个性化运动度量，用于评估认知努力、能动性和作者身份，并提供一套全面的测定方法，为借助触觉支持的辅助打字开辟新的研究方向。

1 引言

交流对人类能动性至关重要。在困难情境中，能够随时随意地将我们的感受、情绪以及心理或身体状态即时传达给他人，可能成为救命的保障。在自闭症谱系障碍（ASD）领域，交流问题直到最近才开始受到关注；当通向自主运动控制的神经发育路径延迟或停滞时，目前尚无充分的研究成果可为语言习得过程提供指导，而这似乎正是需要高度支持且无法言语的那类自闭症谱系障碍的情况 [1]。

美国疾病控制中心（CDC）的保守估计显示，约有30%的自闭症人士仅能进行最低限度的口语交流，或完全不使用口语（非口语自闭症谱系障碍，ns-ASD）[2, 3]。然而，目前没有可靠的统计数据能够告诉我们有多少人可以通过打字或指点进行交流。在较为成熟的情况下，自闭症人士能够流畅地在键盘、平板电脑和字母板之间切换，与他人交流（**补充图1-3**）。最重要的是，掌握这些技巧的进阶使用者能够说出自己正在打出的词语，因为此时沟通调节伙伴（CRP）仅需在必要时协助调节使用者的身体。调节打字者的一种方式是通过轻触提供触觉反馈。少数能够独立学会打字、甚至开始将自己打出的短语说出来的非口语自闭症谱系障碍人士，经历了一段学习历程，最终达到了这种独立程度。然而，我们尚不了解促成这一非凡成就的机制。我们需要能够帮助追踪非口语自闭症谱系障碍人士这一过程的衡量指标，尤其是因为我们知道，神经典型者的语言习得遵循截然不同、方向相反的神经运动路径：他们先学会说话，之后到了学龄阶段才掌握书写和拼写来进行交流。目前缺乏针对非口语自闭症谱系障碍人士学习过程的研究。

学习交流是一个需要数年时间的过程，并会经历不同的自主性阶段。起初，这一过程可能过度依赖CRP；但随着学习里程碑逐一达成，CRP 会逐渐将能动性交还给打字者。采用这些已在全球推广的沟通技巧的非口语自闭症谱系障碍者，通常需要调节伙伴来维持对话的流畅进行。与此相应，近期基于数字数据的生物特征指标研究进展表明，不仅有可能追踪习得独立过程中能动性的变化 [4] ，更重要的是，还揭示了独立学习打字过程中亟需的调节程度（见**补充图4**）。

利用可穿戴设备运动学数据得出的运动控制指标进行的研究表明，身体接触可能会降低辅助打字时的认知负荷 [5]。研究者还通过分析涵盖 20 年、涉及多位 CRP 的交流语料库发现，使用这些技巧的非口语自闭症谱系障碍者会为借助此类身体辅助写成的文本贡献自己的风格 [6]。美国的眼动追踪研究表明，在拼写练习中，非口语自闭症谱系障碍参与者会预先看向自己即将指向的字母 [7]。以色列的研究表明，尽管其眼球运动中存在过多的随机噪声 [9]，非口语自闭症谱系障碍者的扫视或许比指向（后者更费力）更能体现其接受性语言能力 [8], 。关于眼球运动的这一发现，与其静息时非自主头部运动中发现的过多随机噪声 [10], 、即使静息时也会因交感神经过度兴奋而出现的心率变异性异常 [11-14], 、步态失调 [15] ，以及其指向视觉目标 [16, 17] 或试图定位和／或区分听觉目标时的自主运动 [18-20]所呈现的情况一致。**补充图4**有力地证明了帮助调节自闭症个体的身心状态、使其达到身体舒适状态的必要性。

1.1 通过提供参照系来调节运动控制

然而，身体独立与传达信息的作者身份并不相同。即使一个人在身体上受到支撑，以便在身体各处提供锚点，并帮助建立可互换的参照系，后者仍然可以实现。在感觉到运动坐标变换中，参照系必不可少，因为不同的外在和内在感觉来源在信号跨不同脑体系统转导和传递时，具有不同的延迟。

当视觉目标（例如键盘或字母板上的一个字母）呈现给大脑，或使用听觉提示促使人执行目标导向动作时，头部必须恰当地转向，并与躯干和

这是一个临时文件，并非最终排版文章

手部协调，以流畅地指向目标字母。在发出运动指令的过程中，会经历若干感觉信号的转导、传递和转换延迟；在手部以受控且协调良好的方式朝目标移动之前，大脑必须将信号从视网膜拓扑坐标系转换为头部中心坐标系 [21]。这类感觉信息流源自<内部感觉源>外部感觉源（光），最初由眼睛视网膜中的光感受器接收。为了生成指向身体外部目标的目标导向动作，与外部源相关的延迟必须与以身体为依托、与内部感觉源相关的延迟相协调。人体拥有许多自由度（DOF），因此，运动的展开使我们能够以无数种方式实现同一个最终目标——尼古拉·伯恩斯坦在上世纪上半叶精辟地阐述了这一问题 [22, 23]。然而，这种冗余也带来了复杂的计算问题，需要花费时间解决，并在此类有目的动作的规划与执行过程中不断更新 [24]。

为解决这些问题，必须整合不同的感觉源，并将其转换为代表当前运动的运动坐标；这些坐标同时也是返回信号流（动觉再传入反馈 [25]），大脑借此更新并预测即将发生的动作所带来的后果 [24]。考虑这些信号的可变延迟，是及时使我们的动作与思想保持一致，并预测有意动作和无意动作即将造成的后果的关键。

由机械感受器介导的动觉再传入信号，与由伤害性感受器和温度感受器介导的其他传入信号流并存。这些以内在感觉信号流为参照进行编码的内源性信号，部分由脑干促进传递；脑干是通往参与自主、反射性、自发、非自主、自动和随意运动的皮层下结构与皮层结构的通道 [26]。鉴于脑干自受孕以来在中枢模式生成和保护性反射中发挥着核心作用，我们认为，脑干对于实现外部（以世界为锚定）与内部（以身体为锚定）感觉源之间所需的时间计量对齐至关重要 [27]。

因此，不同感觉运动信号流之间的时间对齐不仅是产生大运动的必要条件，也是通过发声器官中的共享结构，在发声过程中协调精细运动控制的必要条件。从出生起，动力源（呼吸）、声源（发声）以及滤波和调节系统（共鸣和构音）就必须协商这些时间对齐编码，以掌握对呼吸、吞咽和发声的自主控制 [28] ——避免进食时呛噎或将食物吸入肺部。在神经典型发育过程中，这些时间对齐会自然流畅地发生，因此在我们的研究项目中通常不会特别关注。然而，一旦与自闭症相关，我们就会发现感觉处理和感觉运动整合自出生以来便存在明显延迟 [16]。

在美国，出生时常规进行的听觉脑干反应（ABR）测试揭示了听觉领域存在此类明显延迟 [29-33]。通过追踪纽约州和佛罗里达州的公共记录，我们发现，出生时听觉脑干反应潜伏期明显延长、反应范围带宽变窄的新生儿，后来在3至4岁时被诊断为自闭症；而这些特征在1至6岁的自闭症儿童中仍然存在 [29]。听觉脑干反应的这种时间错位必然会影响运动编码，[26, 34, 35]。脑干在中枢模式发生器产生自发运动过程中的作用，对于维持贯穿一生所必需的健康运动变异性至关重要。健康的运动变异性是形成稳定运动知觉、并实现对生物力学运动进行认知控制的必要条件 [16, 17, 36, 37]。

婴儿早期自发运动的质量表明神经运动控制轨迹是否健康。随着全身的自发动作逐渐转变为抗重力的意向性运动，我们可以非常早地量化自主神经运动控制的适当发展 [38, 39]。我们还可以追踪那些伴随目标导向运动而产生的偶发性自发动作 [36, 40], , 因为它们有助于我们理解意外后果，并帮助我们学会通过运动建立意识 [41-45]。总体而言，通过互补的作用，自发动作和意志运动能够帮助我们追踪身体运动知觉的发展、更新身体图式，并且用 Esther Thelen 的话说，帮助我们为具身认知奠定神经系统的基础并使其定位于身体之中 [46-48]。

具身认知可以通过嵌入有目的的动作中的自发手势动作来追踪，这些动作能够通过生物传感器检测到。其中包括用指向来进行交流 [16, 49] ，或进行体育运动和舞蹈活动 [36]。它们的变异模式不同于描述我们动作的连续轨迹中那些有意为之的片段 [36, 37, 40]。我们的末端执行器所完成的有目的运动轨迹中，自发片段受到的几何约束不同于有意片段 [37]。它们的时间动态反映了产生我们动作的力量 [36, 37], , 而有意片段的情况则不同：预期运动路径的几何特征往往不受力量变化的影响 [36, 40, 50-52]。一旦启动，指向键盘上某个字母的预期路径的几何特征，即使加速度和速度模式发生变化，也会保持稳定。因此，我们可以在同时包含有意片段和自发片段的自然动作中，自动识别并分离出心理意图的关键特征以及身体意志的关键要素，[37, 53-57]。由于认知努力也会使我们动作中的自发变异增加，因此这些变异可以反映认知负荷的水平 [17, 37]。此外，由于自发运动会在开放式对话中自然流动，而这一过程大多发生在人的意识之下，我们可以利用它们理解人们在生成用于表达思想的语义短语时所经历的创造过程。自发运动在自闭症中得以保留 [16]。因此，它们提供了一种可变且具有可塑性的信号，帮助系统发展动作所有权感，并最终增强个体的能动感 [17]。因此，我们可以利用自发动作追踪个体内在思想在辅助沟通中逐渐展开时的能动性和所有权水平。

本文提出一组测定方法和个性化、标准化的生物特征指标，利用身体非优势侧的自发运动，区分开放式与指令式交流情境中的作者身份。当一个人用身体优势侧打字或做手势进行交流时，非优势侧也会同时运动，而打字者和 CRP 大多意识不到这些运动。因此，在交流过程中与优势侧运动同时发生的非优势侧运动，无法被外部主体故意操控而不被察觉。我们发现，无论是在物理空间还是随机空间中，头部运动都更接近身体非优势侧的运动，因此有望作为一种代理指标，反映能动性、认知努力和语义作者身份的水平。本文提供不依赖特定假设的生物特征指标，用于客观追踪一个人的交流过程，无论此人是独立打字，还是在触觉反馈的辅助下进行交流。我们为研究因躯体感觉运动控制问题而需要身体支持的交流开辟了一条新途径。

2 方法

2.1 参与者

本研究在罗格斯大学感觉运动整合实验室进行，遵循机构审查委员会方案 Pro2020000154（“神经系统的数字化表征”），并符合《赫尔辛基法案》。我们获得了成年参与者同意，允许对其进行视频和照片记录。这是一项涉及 Matthew Hayes（MH）的案例研究；MH 是一名被诊断为自闭症谱系障碍的成年新兴语言使用者，他自愿参与研究，并通过多种方式与我们的团队交流。这些方式包括 iPhone、带有字母的袖珍硬纸板、较大的字母板和电子键盘。参与者能够独立打字（无需他人托住键盘）。他打字时会将词语重复说出。打完整个短语后，他也会将其朗读出来。在我们设计的一组测定方法中的某些情况下，CRP 通过轻触参与者的右膝提供触觉反馈，以抑制下半身的不自主动作。当没有打字时，参与者会用打字的手旋转衣架来安抚自己。在实验过程中，当他把衣架放到一旁开始打字时，他会在思考开放式问题的答案时用打字的手做出其他思索动作。这些思索动作在指令性打字期间很少出现，但随着认知努力再次出现，尽管其形式与扩展性的开放式运动性前奏期间明显不同。我们在各条件之间安排休息，以尽量减少并避免疲劳。参与者会在想喝水、吃零食或只是想从实验中休息时告知我们。

这是临时文件，并非最终排版文章

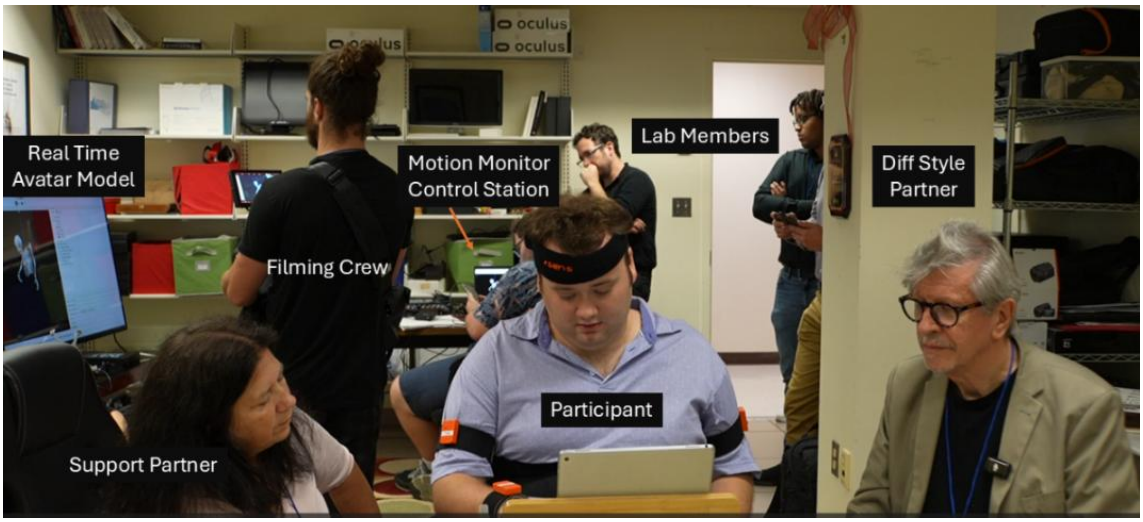

图1. 实验设备和参与者。Matthew Hayes（MH）和他的母亲Rene Hayes并排坐着，面朝支架上的键盘和屏幕，屏幕上可以看到输入的文字。Daniel Orlievsky博士观察了参与者的表现，之后改为担任沟通伙伴，并使用笔记本电脑上的另一把键盘。参与者此前从未见过他。

2.2 实验设备

参与者 MH 舒适地坐在桌旁，CRP 和另一名他不认识的临床医生分坐在他两侧。MH 的对面坐着进行访谈的第一作者（EBT），两台摄像机从不同角度记录会话视频。一名专业摄像师还在房间另一侧进行视频拍摄。本科生和研究生协助完成研究的后勤安排。另有两名临床医生旁听了访谈。实验布局见**图1**。

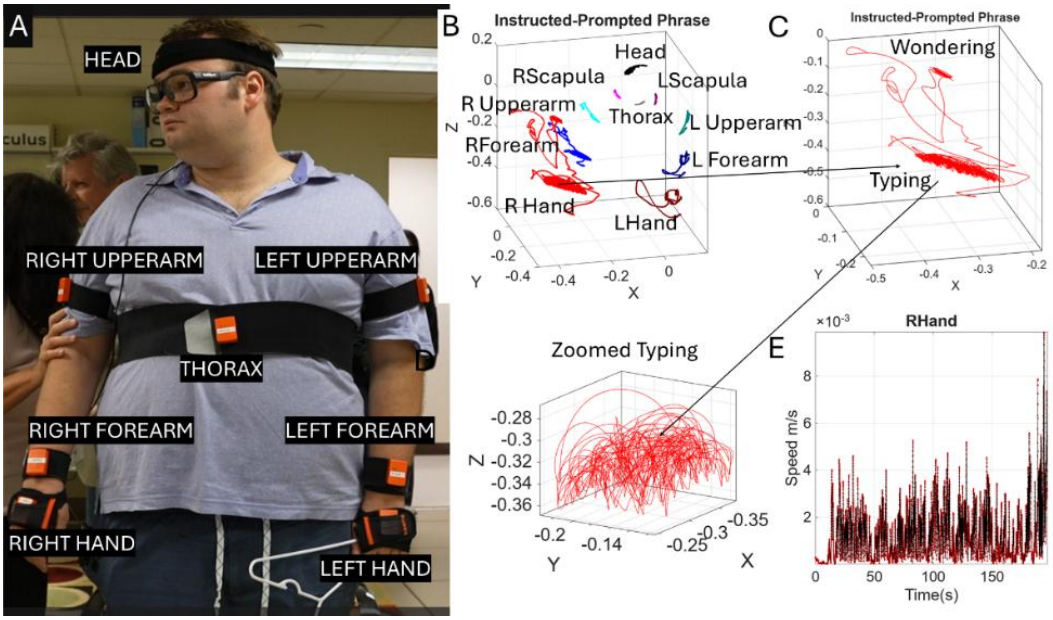

图2。传感器与示例轨迹。（A）使用八个可穿戴传感器以100Hz的频率采集数据，传感器расположж于图示配置中。（B）所有传感器的示例三维位置轨迹，绘图显示其在物理空间中的位置。（C）反映打字动作及部分思索动作的示例手部轨迹。（D）打字动作中的放大手部轨迹。（E）由手部连续三维位置轨迹推导出的示例时间速度曲线（使用适当的内部开发程序进行平滑处理，该程序采用样条插值方法以及MATLAB中的导数函数）。

我们使用集成于 Motion Monitor系统（Sports Inn，美国芝加哥）的XSense系统采集位置与方向数据（采样分辨率为100Hz）。同时，我们还使用 Noraxon Ultium肌电传感器采集心率变异性，采样分辨率为4kHz，并与运动学数据（以100Hz降采样）同步采集，且均在 Motion Monitor界面内完成。关于心率变异性和面部数据，我们将在另一篇论文中报告。一个呈现参与者上半身骨架的三维化身实时显示手臂关节轨迹，以及头部和手部轨迹（上半身的末端执行器）（**补充图5**）。摄像机（索尼和 Cannon）连续记录面部和上半身视频，以便使用姿态估计进行单独分析。此外，我们还使用运行于 iOS平板电脑上的 Lately应用（Neuroinversa LLC，新泽西州，美国）采集了实验前后的面部扫描。我们还在 CRP 的手腕上放置了额外的XSense惯性测量单元（IMU）传感器（采样频率为100Hz），以进一步数字化并测试其他二元互动。**图2**显示了传感器在上半身和头部的位置。

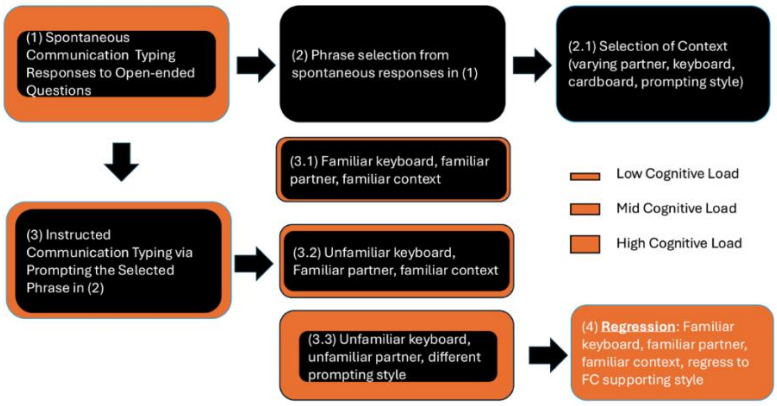

图3。通过打字自动提取交流中作者身份运动特征的测定。（1）通过开放式问题引发自发交流。（2）从对开放式问题的回答中选取一个短语，在指令性打字过程中进行提示。（2.1）在指令条件下，以符合生态效度的方式选择环境变化，以增加认知、记忆和情绪负荷，类似于自然社交情境。（3）通过提示在（2）中选定的短语，输入指导短语。（3.1）使用熟悉的键盘、熟悉的CRP和熟悉的语境输入指导短语时，认知、记忆和情绪负荷较低。（3.2）使用新的（不熟悉的）键盘以产生中等认知负荷，同时保留CRP和相似语境。（3.3）通过换用布局不同的新型、不熟悉的键盘，以及更换沟通伙伴和提示方式，引入高认知、记忆和情绪负荷。（4）其他条件包括用白纸覆盖键盘以遮挡字母；回到学习过程早期、婴儿期所采用的旧式辅助沟通方式。对优势与非优势身体部位及末端执行器的生物节律进行同步记录。

这是一个临时文件，并非最终排版文章

2.3 自动提取作者运动特征的测定

我们考察了上半身各部位的生物力学特征，以探究以下两种情形之间的根本差异：一是个体在构思并通过打字短语（并将其说出）进行自发交流时，对身体运动输出的自主控制；二是在他人提示下打出相同短语时的情况。我们采用运动学分析和随机分析。关于心率变异性和面部数据的结果将另行报告。重要的是，我们特别考察身体的非优势侧，因为当优势手以开放式或指令模式打字，或在 CRP 协助下打字时，身体非优势侧同时发生的运动会超出 CRP 以及打字者本人有意识控制的范围。该范式旨在诱发以下条件之间的运动差异，其中顺序十分重要（见**图3**）。

2.4 从适应新语境和环境到热身动作 t

在实验开始前，我们记录了热身动作。这些是在适应实验设置、传感器、实验室的物理布局以及总体上的群体社会情绪氛围时产生的自发运动。我们获取了从上半身在物理三维空间中的运动轨迹，以及其在Γ 流形上的随机轨迹；不过，这些并不属于实验本身。它们是任何社会情境中自然适应过程的一部分。

2.5 实验流程

首先，需要使用能够引发自发想法的开放式问题来探测交流表现。在此过程中，我们记录受试者输入的短语（如果言语正在形成或已经稳定，也记录其说出的短语）。如果没有言语，我们可以记录受试者产生的发声、回声式短语、自言自语或任何自发言语。其次，需要从对开放式问题的自发回应中，或从任何自发的自我言语中，选取一个短语（发声、回声式短语或自我言语）。最后，在指导下通过提示该短语，探测受试者在不同认知、记忆和情绪负荷下输入或拼写所选短语／自发生成的言语。需要注意的是，启动手臂—手部联动来进行输入属于粗大运动行为，而发声属于精细运动行为。二者都可以接受测试，并使用相同的这些生物特征指标进行数据记录和分析。

认知负荷从低到高不等：低负荷（使用熟悉的键盘或字母板）；中等负荷（使用不熟悉的字母板或键盘，但保留CRP）；高负荷（同时使用不熟悉的字母板或键盘，并由不提供身体支持的不熟悉的沟通伙伴协助）。在具有生态效度的情境中，例如现实生活中需要与互动风格各异的人交流时，后者会引发情绪负荷。除此之外，我们还纳入了一种条件：由熟悉的伙伴提供支持并使用熟悉的键盘，但要求参与者和CRP退回到MH童年期学习初期练习过的辅助沟通（FC）支持方式。在这种条件下，伙伴的手充当打字者的支撑锚点，并在参与者打字时引导其手部动作。鉴于MH的独立程度，我们假设，与在没有此类支持的情况下打出提示短语相比，这种情况下的表现会更加多变。这种退回童年时期的方式会增加对潜在二元共享运动程序的记忆负荷。该测定也使我们有机会衡量表现过程中的能动性和领导力水平，因为它们会随时间动态变化。此外，我们假设，对开放式问题的自发打字回应会呈现出与指令性情形截然不同的运动特征；指令性情形即提示参与者写出从测定的开放式回应阶段中说出并打出的内容里选取的短语。**表1**汇总了本研究所考察的案例；我们保存了记录条件的视频和/或同步记录运动学、心率变异性（HRV）及视频的生物传感器数据。**补充图1-2-3**展示了键盘和伙伴协作方式的变化示例。

2.6 意识之下的自发动作作为作者身份的运动特征

我们提出，认知负荷水平的提高会增加生物力学运动动作的变异性，并且这种变化既会体现在三维空间中的物理运动轨迹上，也会体现在由线速度相应微小变化衍生出的随机轨迹中

实验室的既有证据支持了这一假设，研究对象为神经典型者 [54, 58, 59]。这一推测的关键在于监测主要发生在意识之下的自发运动。具体而言，我们监测身体非优势侧的自发动作，因为参与者在执行生物力学动作时无法有意控制身体的这些部位 [36]，它们也不受CRP意识的影响。坐在参与者对面的不熟悉伙伴和提示者同样无法察觉这些动作。事实上，我们的全部关注点都放在优势手的打字上，因为这只是唯一用于打字的手。非优势侧的偶发动作大多在我们的意识之下自发发生，被用作运动特征，以指示开放式情境中的作者身份水平；这些水平高于我们在整个测定过程中所采用的认知努力水平。

在辅助沟通的自然情境中（例如，促进性沟通（FC）、快速提示法（RPM）、拼写沟通法（S2C）等），身体非优势侧会自发地移出 CRP/提示者的触及范围，甚至在打字时也会移出打字者的触及范围。鉴于我们发现自发运动是理解意志和运动控制的关键 [16, 36], ，我们精准聚焦于这些自发的、无目标的偶发运动，以此作为参考，比较在打字输入短语来回答开放式问题时的认知负荷水平与创造性思索，以及在指示下输入同一短语时的情况。我们还监测了 CRP 辅助打字者的情形：打字者将手放在 CRP 的手上休息（见**补充图1-2-3**）。我们持续录制视频，并将所有这些条件下的生物传感器数据保存于**表1**中。

2.7 运动学分析

所有传感器采集的三维位置数据每 5 分钟缓冲并保存一次，以避免对话过程中数据丢失。Motion Monitor 软件可实时显示上半身位置轨迹的变化过程（**补充图5**），以及肌电传感器采集的心电图数据和大量运动学参数。随后，我们使用内部软件分析位置数据。借助 MATLAB 样条工具箱，我们对位置轨迹进行平滑处理，并计算线速度，以检查其生成的连续时间序列中的峰值和谷值。我们保存了所有数据，并通过视频和音频录音记录各次会话。**补充图6**展示了获取时间速度曲线并进行详细运动学分析的步骤。

2.8 随机分析

我们使用速度曲线来考察峰值及其延迟。使用 MATLAB 中的函数 *findpeaks*获取峰值及其位置（延迟）。由于篇幅限制，峰间间隔（IPI）延迟将在另一篇论文中介绍。将线速度峰值幅度汇总为频率直方图，并使用 MATLAB 中的分布拟合工具箱确定拟合效果最佳的分布。我们还使用最大似然估计（MLE）函数探究不同情形。从最大似然估计的角度来看，连续伽马分布族的概率分布拟合效果最佳。我们使用 95%置信区间，以经验值确定由线速度峰值导出的微运动尖峰（微峰）的 Γ 形状参数和尺度参数。随后，我们计算每组幅度和延迟参数的 Γ 矩（均值、方差、偏度和峰度）。**补充图 7**展示了这些分析的流程；相关分析此前已发表并获得专利。

2.9 MMS微峰与伽马参数的标度幂律

Γ参数的双对数关系遵循标度幂律[16, 60]。我们计算了每种条件下的斜率、截距和拟合优度。我们也计算了Γ 微分熵随Γ形状变化的关系。**补充图8**展示了三种条件下具有代表性的线性拟合，所有数值均列于**表2**中。

这些Γ 分布参数受几何约束限制，其中方差和微分熵都与单一驱动变量（即形状）相关联 。

$$(a)$$

这是临时文件，并非最终排版文章

$\ln(b) = -M \ln(a) + C$ 其中 M > 0，通过幂运算可简化为幂律

$b = e^{C} a^{-M}$ (方程 1)

2.10 Gamma 方差与标度幂律的关系

$$\sigma^2 = a \cdot b^2 = a\left(e^{C} a^{-M}\right)^2 = e^{2C} a^{1-2M} \qquad \text{(Equation 2)}$$

该方程的物理含义是，方差遵循完全由形状参数驱动的幂律。在方程 2 中，如果 M = 0.5，指数就变为 0，使方差固定在这一常数值；但如果 M > 0.5，随着形状值增大，方差会趋近于 0。在方程 1 中，我们将求出指数 M（斜率）的值，并考察不同测定之间的差异。

2.11 Gamma 微分熵与 Gamma 形状和方差的关系

连续随机变量 X 的微分熵的一般定义为：

$$H(X) = -\int_0^{\infty} f(x) \ln f(x) dx \qquad \text{(Equation 3)}$$

对于标准 Gamma 分布（采用我们针对人类的标度幂律）：

$$H(X) = C + a - M \ln(a) + \ln\left(\Gamma(a)\right) + (1-a)\Psi(a) \qquad \text{(Equation 4)}$$

因此，我们将微分熵表示为 Γ 形状的函数，而斜率 M 起调节作用。Γ 形状决定了方程 3 和 4 的表现，系统的动态会根据数值而完全不同

斜率 *M*。因此，一个问题是，不同认知负荷的检测条件之间是否存在可由这些关系捕捉到的差异。为回答这一问题，我们针对每项测定的 12 个形状与尺度的双对数散点图，分别求出 M（以及截距 C）的值；对于以形状为函数的微分熵散点图，我们也进行了同样的处理。我们在 **补充表1** 中报告了 M 和 C 的取值范围。

2.12 斜率 M 的可能情形

情形 1 – 高反向标度：当 M > 0.5 时，尺度会随形状增加而快速减小。当 $a \to \infty$，方差 $\sigma^2 \to 0$，因为指数为负。熵会降至负无穷。尺度参数的剧烈压缩超过了形状参数的扩散效应。

情形 2 – 低反向标度：当 M < 0.5 时，随着形状增加，尺度缓慢减小。随着 a 的增加，方差趋向无穷大，因为指数 $1-2M$ 为正。熵趋向 $\sigma^2 \to \infty$

正无穷。展宽形状参数 a 占主导地位，尺度仅略微压缩。

情况 3 – 临界阈值 *M = 0.5*。在这种情况下，$\sigma^2 = e^{2C} a^{1-2M} = e^{C}$。这会导致固定的方差保持为常数值，完全与参数解耦：e^{C}。熵

$$\sigma^2 = \left(e^{C} \frac{1}{\sqrt{a}}\right)^2 = e^{C}$$

仅取决于形状，因为方差被严格固定为 ，形状的任何变化都会仅通过改变分布的几何形状来改变熵 （从高度偏斜、类似指数分布的轮廓转变为对称的钟形曲线），而不改变整体标准差。随着形状参数增大，Gamma 分布会趋近正态分布。

2.13 主体性指数

在先前的研究中，我们将社会运动能动性指数定义为运动控制与运动自主性的比值 [4]。运动自主性以近似熵表示，这是一种衡量有序程度的指标，范围从低到高：低代表完全有序（确定性），高代表完全无序（混沌）。从外部控制者的角度来看，在混沌这一端，被控制者的系统无法被控制，因此具有完全的自主性。另一个极端（确定性）则意味着，从外部控制者的角度来看，被控制的系统完全可控，因此不具备自主性。当 CRP 引导参与者的手时，我们希望量化 CRP 在多大程度上完全让渡了自身的自主性（近似熵较高），从而让参与者驱动动作。在这种情况下，CRP 的运动系统引导对方，却不会以控制力压制对方；而在遵循指令的情形下，参与者则放弃全部自主性，按指令行动。

能动性比率中的另一项指的是预测性运动控制。为了获得这一指标，我们依据刻画 MMS 伽马过程的标度幂律，其中 Γ-NSR（方差均值比）涵盖了一个范围：一端是可预测性和信号确定性，另一端则是随机性以及以高噪声为特征的无记忆过程。预测性运动控制良好的系统具有较低的 Γ-NSR，这也对应于较高的 Γ形状参数值，并趋近于高斯分布
Γ概率密度函数连续族的不同状态。以下是根据下面的公式5得出的指标：

$$Agency = \frac{PredictiveControl}{PredictiveControl + Autonomy} = \frac{\Gamma_{SNR}}{\Gamma_{SNR} + MidApproxEntropy} \quad \text{(Equation 5)}$$

Γ_{SNR} 为 $1/\Gamma_{NSR}$，其中 NSR 根据连续伽马分布族概率密度函数的尺度参数进行经验估计，因为

该 ΓSNR 数值在公式6中被归一化至 0 到 1，具体做法是获取参与者在该会话各项检测中的所有数值，以及 CRP 的所有数值：

$$Normalized\ \Gamma_{SNR} = \frac{x - \min \Gamma_{SNR}}{\max \Gamma_{SNR} - \min \Gamma_{SNR}} \quad \text{(Equation 6)}$$

其中，x 是该会话每个测定片段中角速度 MMS（或加速度 MMS）的估计 ΓSNR，最小值和最大值取自该会话的所有帧，并汇总打字者与 CRP 数据集。

近似熵同样按照方程7归一化至0到1之间：

$$NormalizedApproxEntropy = \frac{x - \min ApproxEntropy}{\max ApproxEntropy - \min ApproxEntropy} \quad \text{(Equation 7)}$$

其中，x是会话中每项测定的近似熵估计值，最小值和最大值取自所有帧，并在打字者和CRP数据集之间汇总。然后，我们得到方程8中归一化近似熵的中点：

这是临时文件，并非最终排版文章

$$(\quad) \quad \text{最大值 - 最小值 中间近似熵 归一化近似熵 归一化近似熵} = 2 \quad \text{(方程8)}$$

通过追踪这一定义社会运动能动性的比率，我们试图了解CRP与打字者之间互动的逐时刻演变，尤其是在辅助打字（促进性沟通，FC）过程中。

2.14 转移熵分析

我们使用 Infodynamics-dist 工具箱（1.6 版）[61] 在 MATLAB 中计算打字者的传感器与 CRP 传感器之间的连续转移熵。为此，我们使用了陀螺仪传感器测得的角速度。我们获得了成对的传递熵（TE）测量值，以量化信息在时间序列之间的定向流动：这些时间序列分别是从打字者的传感器以及 CRP 支撑（优势）手腕上的传感器所获得的 MMS 微峰时间序列。我们通过测量已知一个系统过去的信息（将打字者设为源）能在多大程度上降低对另一系统（将 CRP 设为目标）未来事件预测的不确定性，且超出仅凭该系统自身过去信息所能提供的程度，来量化统计因果关系。随后，我们对调换源和目标，获得一个非对称条目值矩阵；该矩阵通过行表示二人组中哪一方的哪个身体部位引领了交互。我们考察过去 100 毫秒和 200 毫秒的时间范围，因为这适用于视觉处理和运动再传入感觉处理的延迟范围 [62-66]。

2.15 交叉相干性分析

我们还计算了整个会话期间各项测定（范围为 8,000 至 20,000 帧）中代表性角速度 MMS 微峰之间的相干性估计值（0–1），并将其表示为频率（以 100Hz 为单位）的函数。我们还获得了各项测定对应的互谱相位（度）和频率图。我们采用打字者各身体部位与 CRP 优势手之间的总体中位相干性值以上的数据，来确定打字者身上的各个传感器与 CRP 的支撑手（通过其腕部传感器）之间的（成对）同步程度。

2.16 随机空间几何分析

在我们的随机分析中，参数空间中的点是 Γ-概率分布函数。由于
Γ-参数（形状和尺度）构成一个曲流形 [67] ，因此欧几里得距离不适合作为衡量Γ-概率密度函数变化的相似性度量，我们采用 Fisher-Rao（FR）度量[68]。该度量适用于测量此关注空间中两个Γ-概率密度函数点之间的距离，尤其适用于区分Γ 认知负荷增加时运动微峰特征的变化[69]。此外，我们还求得代表不同Γ-参数对之间的测地线（最短距离路径），这些参数对表示身体各部位的不同Γ-概率密度函数，并将相应状况定位为参数空间中的点。随后，可利用这些形状参数和尺度参数的测地线路径值，得到由 和构成的相应统计路径。

$$\Gamma\mu \qquad \Gamma\sigma^2$$

我们测量每种条件下右手和左手对应的 Γ-概率密度函数之间的 FR距离。此外，我们还考察感兴趣的实验条件所对应的代表性测地线。这些条件列于表1。

将各条件下的右手与左手 FR距离值绘制出来后，我们可以得到代表性点，以绘制并比较右优势手与左非优势手之间对应的测地线路径。我们还计算了从每个传感器位置（**图 2A**中的身体部位）到其他各个身体部位的成对FR距离。这一 FR距离对称矩阵以色彩图呈现：在 Γ-流形上，蓝色色调表示相似度高（FR距离小），黄橙色色调表示相似度低（FR距离大）。

2.17 物理空间的几何分析

我们分析了三维空间中物理轨迹的几何特征。这对于建立随机空间与物理空间之间的对应关系，以及研究运动学参数和

Γ——能够按其在会话期间的演变顺序，最佳表征不同认知负荷水平的参数。物理距离分析将抽象的随机流形分析锚定于我们的物理现实。

首先，我们使用速度剖面来确定曲线的长度（分别针对右侧和左手的每个传感器），方法是沿路径累积速度大小。我们采用黎曼流形上连续可微曲线的路径长度（弧长）s的微分几何定义，M，即方程中曲线的速度相对于度量张量的积分9 [70]:

$$s = \int_a^b \left\| \frac{d\gamma}{dt} \right\| dt = \int_a^b \sqrt{g_{\gamma(t)}\left(\frac{d\gamma}{dt}, \frac{d\gamma}{dt}\right)}\, dt \qquad \text{(Equation 9)}$$

其中 是一个将区间 映射到流形 M 的光滑曲线，是曲线在参数 处的切向量，位于切空间 中，g 是黎曼度量张量，它定义了每个切空间上的内积，而 是由度量诱导的范数，其中

其次，我们计算了优势手得出的物理距离与非优势手速度轨迹的路径长度之间的绝对差值。最后，我们以与两只手对应的经验估计 Γ-概率密度函数的随机 FR 距离相同的格式绘制这些结果。我们考察了运动特征的抽象随机流形描述所得到的 FR 距离趋势，与根据三维物理轨迹计算出的距离趋势是否一致。请注意，我们采用欧几里得线元，求得三维速度场的速度大小（三维位置点处曲线的局部切向量）；该速度场由对手部（及其他传感器）的三维位置轨迹进行适当平滑和求导得到。计算路径长度时，我们使用了公式 9 中速度大小的累积和。因此，我们的计算反映了曲线轨迹的真实路径长度，而不是初始位置之间的欧几里得距离

手部的手部最终停留的位置条件确定时。

3 结果

3.1 非优势侧身体运动轨迹自动区分独立自发、指令和引导式表现

3.1.1 热身对话

我们记录了参与者与实验人员之间自发、主动发起的对话（保存的视频和生物传感器）：对话内容包括同意参与研究、回答各种开放式问题，以及回答需要作出“是”“否”或“可能”答复的问题。对话还涉及研究的不同方面、参与者对传感器和仪器的舒适程度、对摄像机拍摄我们即将进行的一切活动的舒适程度，以及实验室里不同人员像在自然环境中一样来来往往的情形。这对于提升研究的生态效度很重要。**图4**展示了由传感器轨迹的时间速度曲线（信号幅度）得出的标准化微运动尖峰（MMS）中的微峰轨迹及其随机分析。每个身体部位质心的三维轨迹（见**图 2A**）均配有相应的时间速度曲线，见**图 4A**。其他面板展示了根据各传感器线速度幅度时间序列中的微峰经验估算得出的 ΓPDF。

这是临时文件，并非最终排版文章

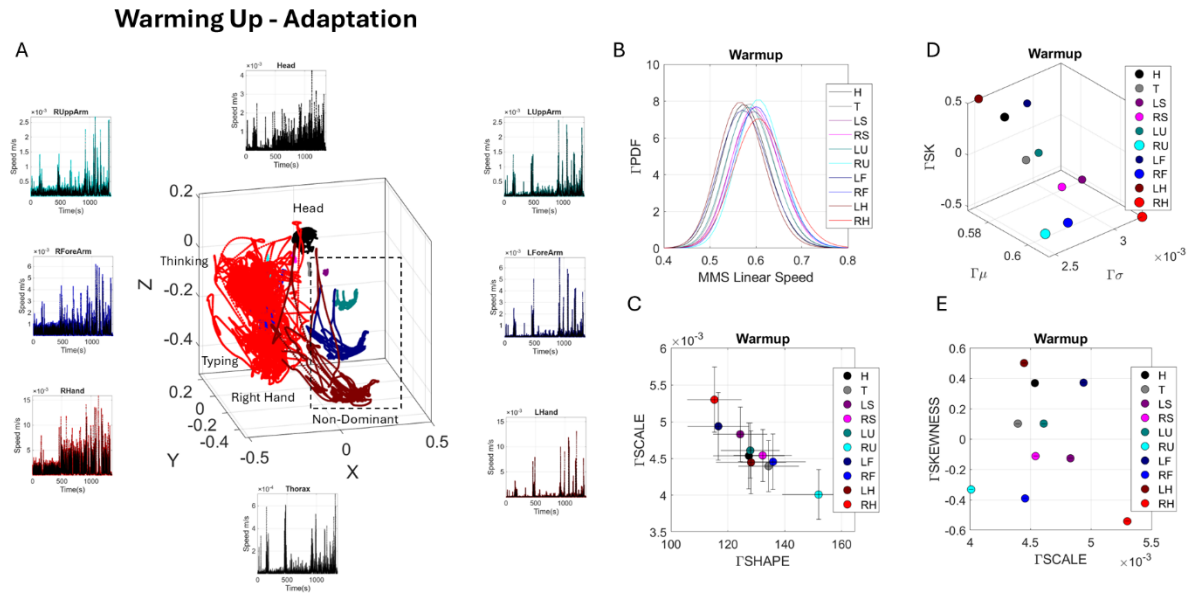

图4. 熟悉环境并适应实验室环境。（A）各身体部位的三维物理轨迹及相应的时间速度曲线，包括优势右侧和非优势左侧。（B）通过经验值确定的Γ 概率分布函数（PDF）。（C）通过经验值确定的各身体部位 Γ 参数及其95%置信区间。（D）相应的Γ矩。（E）Γ 尺度（信噪比）与Γ偏度的投影。

3.1.2 借助触觉支持进行自发开放式交流

我们使用开放式问题引发对话：保存的视频和生物传感器，

EBT。你觉得今天在这里的会议怎么样?

MH：“我认为，非语言交流的程度会影响关系的质量。我的意思是，*Daniel*和*Liz*之间的非语言交流非常好。”

这指的是另一位研究人员（Daniel Orlievsky博士，位于MH右侧，见**图1**），他在会话期间也在场；当我们观察参与者完成任务时，他通过手势与EBT交流。MH察觉到了细微的面部交流，并通过键盘拼写和口头说出这句话的方式表达了出来。

MH: “我想找到一种方法，让许多人都能通过打字表达出来，因为我知道，对一个人来说，沉默就像是住在玻璃后面的平行宇宙里。”

EBT：告诉我，你还记得很久以前，你还小的时候，刚开始打字时的情景吗？你还记得刚开始打字、说出自己想说的话时是什么感受吗？人们会对你做出回应，也会和你交谈，然后你们就开始了对话。你还记得吗？那应该是很久以前了……你还记得吗？因为当人们开始回应你时，那一定是非同寻常的经历。

MH: “我觉得你可以打字，但仍然保持沉默，因为打字一定要表达出内心强烈的感受。我总是在思考宏大的事情，所以打出这些话，就像我自己出现在天空中，让人看见。”

图5展示了开放式交流中的示例轨迹，其中的触觉支持是轻触右膝以安抚身体。随后，优势侧的轨迹比适应情形更为经济（三维移动幅度更短），但非优势侧仍保持参与。这一点

体现在速度曲线的振幅和随机伽马特征中。仅凭优势打字侧的运动噪声转移，无法解释非优势侧这种可区分的参与状态。

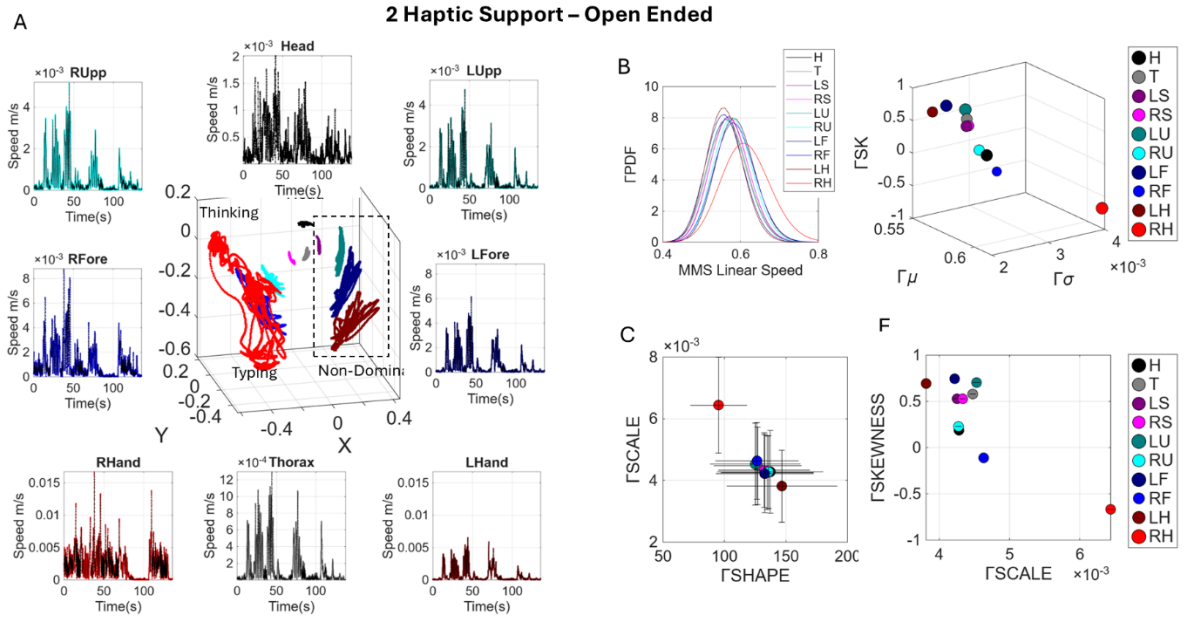

图5。以右膝上的轻微触觉支持回答开放式问题，以帮助控制并减弱右腿的运动。（A）优势侧和非优势侧的三维位置轨迹及相应的线速度时间剖面。（B）经验估算的Γ 概率密度函数。（C）Γ 参数及其95%置信区间。（D）Γ 矩。（E）Γ 偏度和Γ 尺度（NSR）的投影。

3.1.3 无触觉支持的自发开放式交流

图6展示了交流过程中有一段时间未提供支持的情况。保存的视频和生物传感器数据表明：身体非优势侧仍保持活动，这一点可从相应的速度曲线和伽马随机剖面看出。与**图5**中有支持的情况一样，在构思开放式问题答案的过程中，身体非优势侧呈现出随思考过程而变化的反应。这一思考过程带来了更高的认知负荷，并反映在运动编码中。要在随机特征和物理特征中区分认知负荷的这些变化，就需要彻底改变任务版本，以抑制意向效应器的变异性，即抑制打字短语的右手变异性。为此，接下来我们尝试采用指令式任务版本：从开放式问题的答案中选取一个短语，并在不同认知负荷和记忆负荷水平下反复提示MH将其打出。

其他样本的开放式问题及视频中转录的自发回答如下 w.

EBT：有没有哪个时刻让你觉得情况发生了变化？让你觉得人们开始注意到你了？你有没有过这种感觉，还是仍然觉得自己仿佛隐形了一样？

MH: 那些没有这样做的人，我也同样不太怜悯。”

那些 *rrounded by people who believed in me an*

典型

EBT：你会和其他打字员交流吗？他们是否也有同样的感受，也就是说，他们得到相信他们的人支持，但也意识到那些不相信他们的人？其他打字员可能是你的朋友吗？

这是临时文件，并非最终排版文章

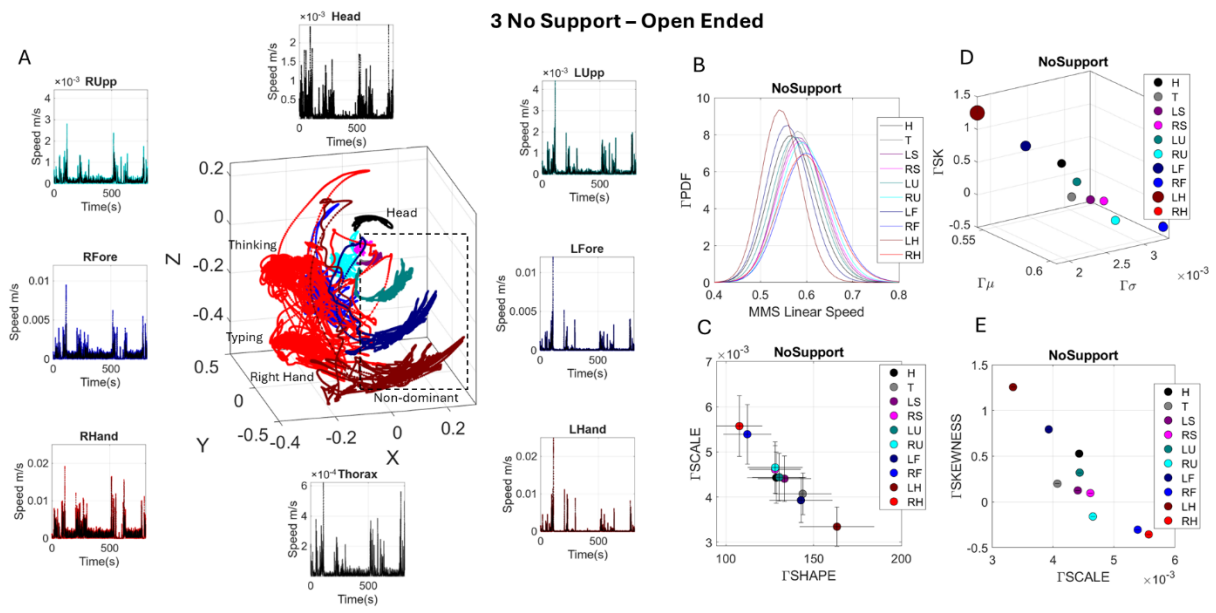

图6. 在没有任何支持的情况下，自发打字回答开放式问题时，优势身体部位和非优势身体部位在三维空间中的运动轨迹。（A）三维位置轨迹及相应的线速度曲线。（B）经验估计的 Γ 概率密度函数。（C）在Γ 参数平面上，带有95%置信区间的经验估计Γ参数散点图。（D）相应的Γ 矩。（E）Γ 偏度与Γ NSR的投影。

MH：“我认为，打字员并不总能感受到足够的支持，因此，他们受到的打击越大，怀疑的声音就越发刺耳。”

“我将告诉你，数百万人正把希望寄托在我们伟大的工作上，而这项工作正在创造一股强大的前进动力。”

我选择这句话来检验指令式交流条件。与开放式打字相比，指令式交流在思维准备方面有着根本不同的要求。无需产生新的想法来表达提示短语。从生物力学角度看，指令式交流表达某个短语的运动要求，应当与此前在自发开放式模式下打出的短语相似。**图 7**使用同一句短语，将这两种情况并排进行了比较。

3.1.4 使用熟悉的键盘进行提示短语的指导式交流 d

参与者执行了打字这一生物力学任务，将完全相同的提示短语输入了三次。保存的视频和生物传感器数据：结果与代表性试次一致，见**图 7**右侧面板。身体的非优势侧变得不活跃。与优势侧输入指导短语时相比，非优势侧的速度曲线振幅减弱。此外，三维空间中的身体变化也体现在伽马特征中。这些结果并列显示在**图 7**底部面板中，分别对应 Γ 矩空间（左）和 Γ 参数平面（右）。

身体非优势侧的Γ 偏度特征发生了显著变化：从针对开放式问题表达自发想法时的状态，转变为按照指示刻意输入同一个提示短语时的状态。前一种情况下，非优势侧的分布右尾较重（偏度高于 0，即对称范围）；后一种情况下，波动则转向左尾较重（波动较小）。

右尾较重的 Gamma 分布表明，MMS 微峰振幅中较大的波动出现得更为集中。根据公式 10 中的比值，分子值越大，表示原始速度振幅与经验值的偏差平均而言 越小。分母不会惩罚 Γμ 分子。相比之下，MMS 微峰振幅的波动较小，这表明平均而言，来自……的波动较大。分母会对分子进行惩罚。下文的公式 10 将……缩放掉 Γμ 由于人群中的解剖差异而产生的异速生长效应 [71]。补充图 7A 显示了样本中一条指令轨迹相对于经验值的绝对偏差。这些偏差受到 Γμ 公式 10，然后是补充图 7B 中完整的 MMS 微峰（用于估算伽马参数、测地距离、测地线路径及相应的矩）。

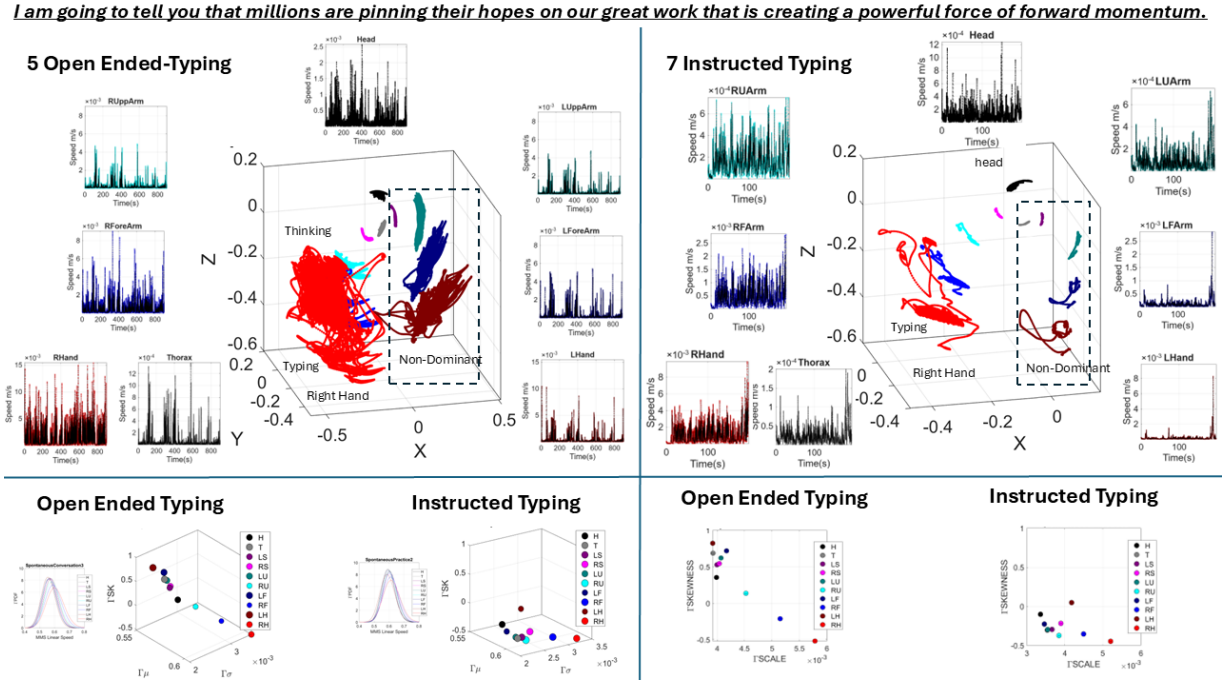

图 7. 打字（和/或口语短语）过程中的交流作者身份运动特征。 对比受试者自发打出上述短语以回答开放式问题（见正文）时的非优势侧身体轨迹、相应速度曲线及经验估算的伽马随机特征，与在刻意指令条件下按提示打出同一短语时的上述指标。请注意，非优势侧的身体运动特征及相应的随机性特征都发生了显著变化——而打字者和 CRP 对此完全没有意识。CRP 为右侧（优势侧）膝盖提供了轻微的触觉支持，以帮助抑制不自主动作。

$$MMS = \frac{Peak}{Peak + Avrg_{\min to \min}} \quad \text{(Equation 10)}$$

这里的峰值指局部速度振幅（峰谷时间序列中的局部最大值），而平均 最小值到最小值 指围绕局部最大值（峰值）的两个局部最小值之间的平均速度值。随着朝向键盘上目标字母的动作变得更加受控，平均速度趋于下降，分子则变大。然后 Γμ

MMS微峰围绕……波动幅度更大原始速度峰值。这些幅度较大的MMS波动累积在右侧，解释了向右侧长尾的偏度Γ-分布范围的偏移。优势手和有意打出该短语的前臂不受影响。相比之下，当速度平均而言有所提高，且运动较少受认知控制、更加自动化时，MMS微峰的波动幅度较小。整体比值使MMS微峰的值更小。此类

这是临时文件，并非最终排版文章

小幅波动累积在左侧，解释了偏度向左侧长尾 Γ-分布范围的偏移。

请注意，无论是针对开放式问题自发打出短语，还是在提示性指导下有意打出同一短语，打字时的优势侧右手和右前臂都保持在相似的 Γ状态。身体非优势侧则会发生随机变化，并始终反映三维物理轨迹中量化的变化。身体非优势侧大多处于意识之外，却会通过运动反映认知负荷的变化。还请注意，单凭疲劳无法解释这些变化，因为我们可以通过指示其打出提示短语，使这些变化恢复到休眠状态；再通过提高认知、记忆和情绪负荷，有系统地重新激活这些变化。

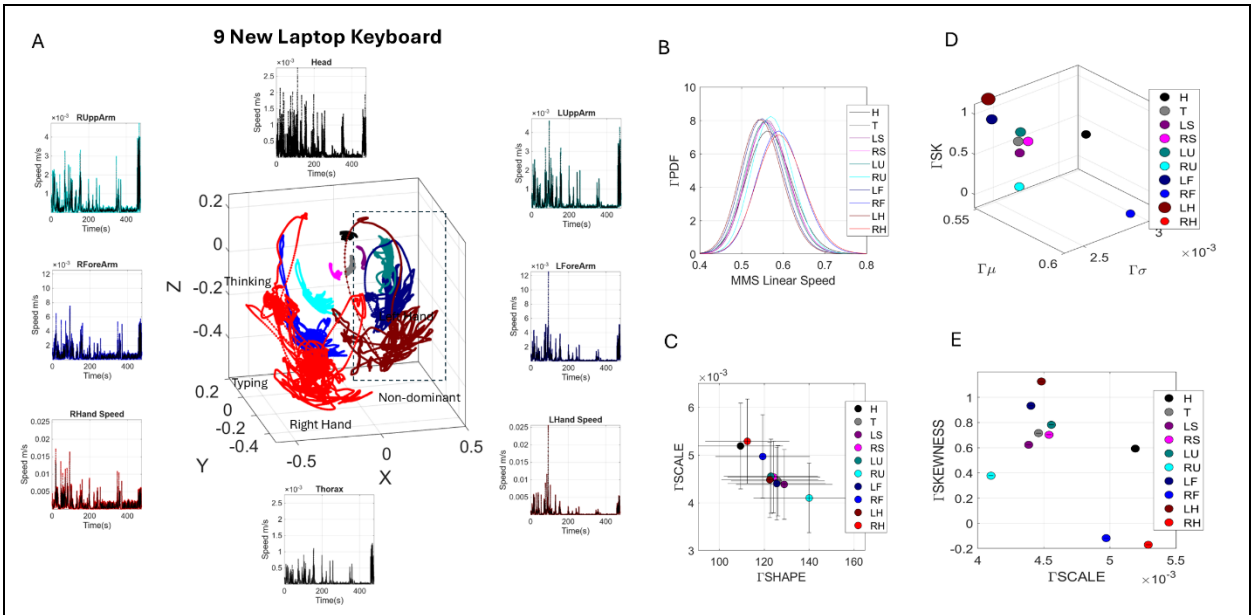

图8。在提示性指导条件下（高认知负荷），使用不熟悉的键盘，与不熟悉的沟通伙伴交流，并采用不同的提示方式，会重新激活身体非优势侧，使其在按指示拼写单词（例如“complex”）时出现变化。所有面板均沿用前述格式。

3.1.5 与不熟悉的沟通伙伴使用不同键盘布局打出的短语

提示和指令性打字是在其他认知负荷更高的情境中进行的（如**表1**所示）。保存的视频和生物传感器：我们操控了环境的新颖程度（熟悉或不熟悉的字母板、键盘、沟通伙伴，以及由熟悉的沟通伙伴全程提供支持的手）。下文将说明测定中指令性部分各项任务的设计依据。

在此条件下，熟悉的键盘被笔记本电脑内置的键盘取代，其布局不同，参与者此前完全没有接触过。这要求参与者对按键进行心理重新映射，并重新适应字母的倾斜方向、字母前景与背景之间的视觉对比，以及字母之间的整体距离。此外，沟通伙伴也换成了一位陌生人；在整个交流过程中，此人不提供触觉支持，且其提示方式与 EBT 不同。

这种高认知负荷条件要求参与者自发思考，重新映射键盘布局，并按指令输入单词。此外，情境也发生了变化。面对不熟悉的伙伴以及不同程度的情感支持，参与者必须重新映射并重新校准自己的运动表现。由于这种条件带来了认知和情感（不确定性）方面的各种负荷，测定要求参与者进行几何变换，以定位新的按键布局，规划一条通往不同目标（字母）的不同运动轨迹，并执行目标导向动作，而这一切都没有熟悉的CRP辅助。这种认知负荷更高的情形如**图8**所示

展示了该测定中拼写词版本的运动输出。**图9**展示了在刻意指令下，该测定中提示短语版本的运动输出。

如上文**图 7**所示（右侧面板，指令条件），身体非优势侧的随机伽马特征的偏度向上移动（如同自发开放式打字中一样），但优势右手除外；在认知负荷的操控下，优势右手仍未受影响。这是意料之中的，因为在这两种情况下，该手都在有意地将打字击键传递到键盘上指定的目标字母。**图9**中在指令条件下、提示完整短语时，也出现了类似模式。在更高的认知负荷下，身体非优势侧重新投入运作。

3.1.6 使用熟悉字母纸板进行指令交流

MH 使用一块熟悉的黄色硬纸板，上面印有黑色字母，用于“单指打字”（见**补充图3右上面板**）。仅保存了视频： 在这种非常熟悉的配置下，MH 会在完整短语的第一个字母上进行单次击键，然后说出该短语。不同于熟悉或不熟悉的键盘——在这些键盘上，他会打出所输入单词的全部字母——在这里，只需输入口语短语中较少的几个字母即可。这块纸板提供了一种更加经济的手臂—手部运动程序协同机制，从而唤起口语短语。用微分几何的语言来说，单次击键可以表示为一条测地线方向，跨越通往目标 [24] 的完整（唯一最短距离）测地线路径。这是切丛中的一个元素，该切丛包含一系列此类测地线方向，代表整个运动程序的测地线轨迹。MH 找到了如何压缩所有这些信息，并将一次击键与完整短语联系起来的方法。利用我们的 Γ-空间，现在可以从几何角度捕捉这种经济的表征，以加速初学打字者的学习过程。

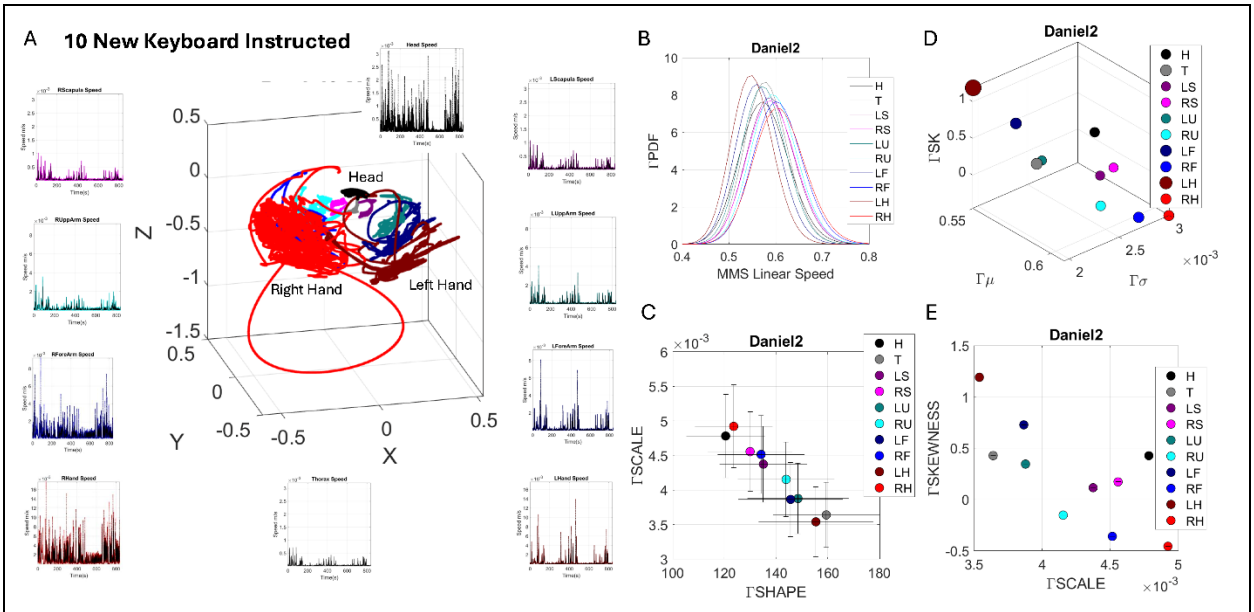

图 9. **高认知负荷下的指导**。陌生的键盘、陌生的交流伙伴、不同的提示方式以及相同的指导短语。所有面板均采用与前文类似的格式。

3.1.7 使用熟悉的硬纸板进行 CRP 引导通信，激发经济高效的运动程序以进行交流，但这一次硬纸板被一张白纸遮住，因此字母不可见

在这种条件下，我们用一张白纸盖住键盘，使参与者看不到字母，从而增加任务的认知负荷。保存的视频和生物传感器：为了在键盘上打字并唤出他口中说出的短语，必须回忆键盘布局并重新映射运动程序。此外，这种条件需要采用FC或引导式打字（见**补充图3**）。进行引导式打字时，打字者的手放在CRP的手上。这种条件还

这是一个临时文件，并非最终排版文章

需要进一步适应，因为在辅助打字时必须退回到儿童期学习的方式，而目前MH能够独立打字。我们假设，这种运动程序回忆会在一条独特的测地线路径上引发更高的变异性。我们还在下一节中通过TE分析，利用这一条件探究能动性和主导模式。

图10描绘了该条件下一次试验的运动输出和随机性特征，我们重复了两次。与此前认知负荷较高的指令条件一样，非优势侧（左侧）身体的Γ 偏度增大（Γ分布的右尾更厚），而优势侧（右手和前臂）则不受这些操作的影响。右手有意移向目标字母时，仍沿着预定轨迹运动；而左侧非预期的运动则通过运动波动，反映出认知负荷的增加。

3.1.8 由熟悉的CRP提供全程支持的指令式辅助沟通

如前所述，考虑到打字时的独立程度，以及指向运动程序与口语同步时自动提取的程度，我要求参与者和CRP在打字过程中退回到一种辅助沟通（FC）形式。这种引导式打字常用于打字学习的初期阶段。我们假设，位置轨迹所反映的运动变异性会受到影响。**图10**为这一假设提供了支持。

图10展示了促进性沟通和遮盖键盘测试中的位置轨迹。这里，我们进一步使用陀螺仪数据，记录她手腕上的 CRP 传感器以及打字者上半身所有传感器的微小旋转。我们首先计算了交叉相干性指标，这是一种频域统计量，用于量化不同频率下两个信号（CRP 和打字者）之间的线性关系、相关强度和相位稳定性。

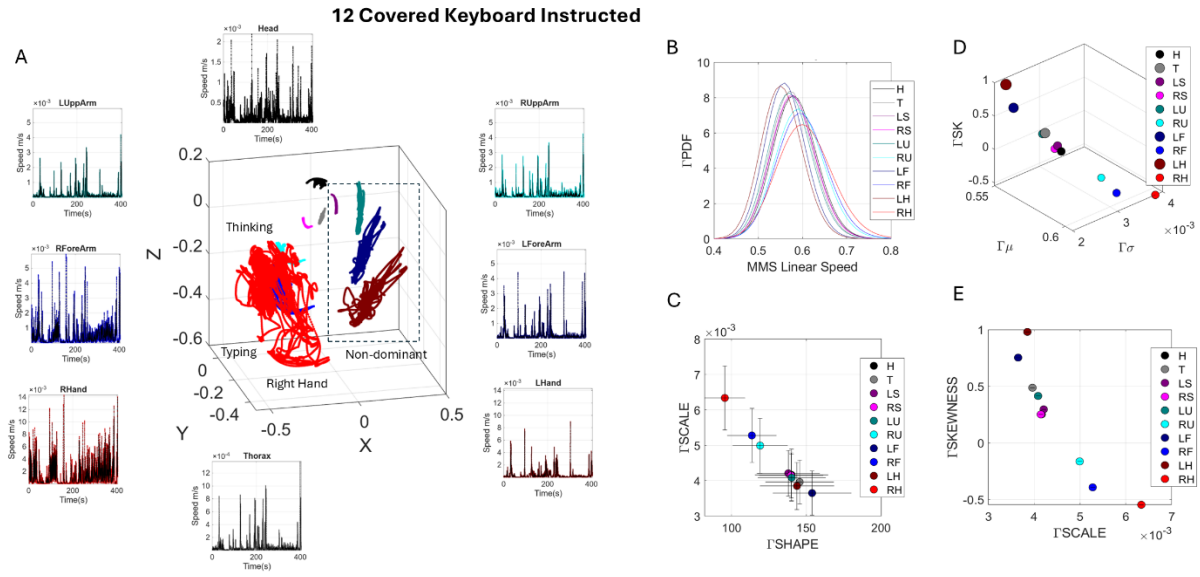

图10。在CRP的促进性沟通协助下完成相同的指导短语 并用一张白纸遮住熟悉的袖珍字母板，挡住字母，从而引发对键盘心理地图的提取需求，以单次手臂移动击打的方式输入词语的开头，并引发词语的发声。请注意，随着认知负荷和记忆负荷的增加，身体非优势侧再次参与其中。如图1所示，现场有两位协作者：一位熟悉的CRP，以及一位不提供触觉支持的新CRP。

补充材料图11展示了交叉相干矩阵，其中对打字者的每个传感器与 CRP 的腕部传感器进行了两两比较。矩阵中的数值为交叉相干性的最大值，其旁边是相应的频率矩阵，表示出现最大值时的频率。在使用遮挡键盘的 2 次 FC试验中，打字者放在 CRP 手上的优势手与 CRP 之间的最大交叉相干值为 0。这表明这两个信号在这些频率下完全不相关或相互独立。鉴于这些信号具有非平稳特性，我们还在 MATLAB 中使用了小波相干函数，并比较了打字者的右手与左手、打字者的右手与 CRP 的右腕，以及打字者的头部和胸廓与 CRP 的右腕之间的相干性；后者为打字者的优势手提供支撑。结果见**补充图12**。这些结果捕捉到了随时间变化的相干性，主要出现在低频范围内。

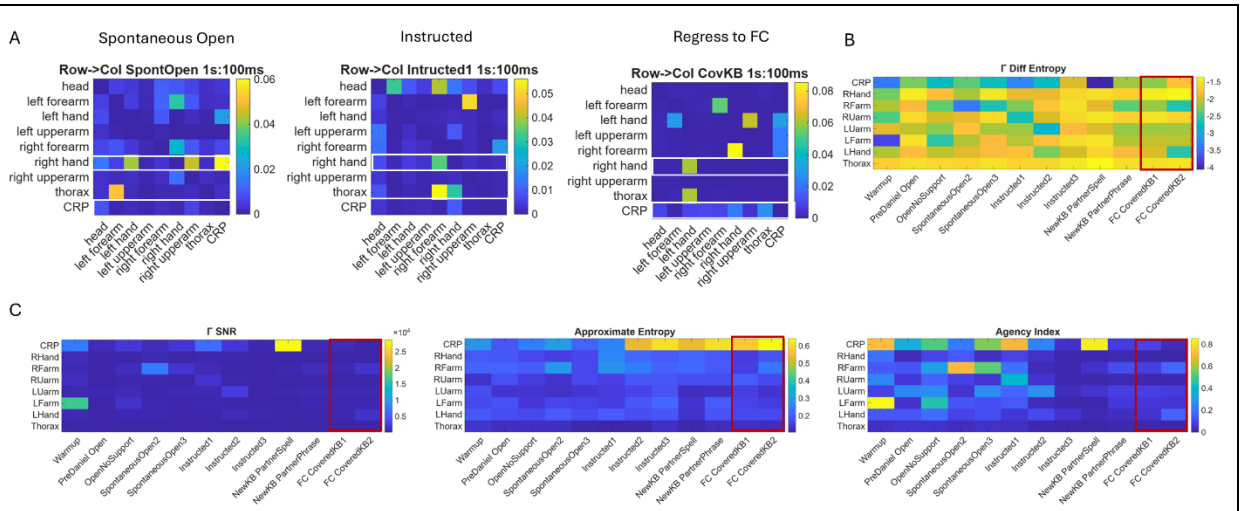

图11：各任务中的传递熵和主体性指数。（A）三个代表性任务：自发性和受指导的回归FC（CRP引导参与者的打字手）。利用陀螺仪角速度轨迹中的微运动尖峰（微峰）来获得传递熵指标，该指标显示打字者的优势手领先于CRP手。（B）Γ 各任务和身体部位的微分熵值。（C）主体性指数，计算为每项任务和身体部位所得Γ 信噪比与近似熵的比值。请注意，在回归FC测定中，CRP的近似熵值较高（低值代表具有预测性和确定性，高值代表不可预测性和混沌性）。红色矩形突出显示使用遮挡键盘的FC试验。

随后，我们还使用CRP手腕的角速度流，以及遍布上半身各传感器的打字者角速度流，检验了传递熵值。我们发现，打字者信号在100毫秒和200毫秒时领先CRP的证据。也就是说，对于这些滞后，了解打字者的信号，比仅了解过去100毫秒和200毫秒的CRP信号，更能降低对CRP信号进行预测的不确定性——这处于有关前庭、视觉和本体感觉整合信号进入运动流的神经基础所报告的延迟界限内 [63-66]。

图11A在3项主要任务中均一致地呈现了这一模式（自发打字回答开放式问题、无支持的指令性打字，以及在触觉支持和遮挡键盘条件下的辅助打字）。在所有情况下，打字者的手在统计意义上均因果性地领先于CRP手腕信号。**图11 B and C**展示了Γ 微分熵值、Γ-SNR和近似熵的计算结果。我们使用方程5-8，得到了一个标准化主体性指数，其计算方式为将Γ-SNR与近似熵结合成比值。**图11 C**展示了由此得到的矩阵。**补充图13**展示了身体传感器的主体性指数随Γ 微分熵变化的趋势；**补充图14**则按任务和传感器位置分别呈现了这些趋势。

这是临时文件，并非最终排版文章

我们使用MATLAB中的相空间重构程序，获取时间序列（按时间均匀采样）的时间延迟（2）和嵌入维数（3），并重构相空间。随后，我们计算近似熵，用以估计时间序列中相似的观测模式在后续增量中不再出现相似模式的可能性。数值较低表示模式重复、可预测或规则（确定性状态）；数值较高则表示随机性、无规律性或不可预测性较强（混沌状态）。

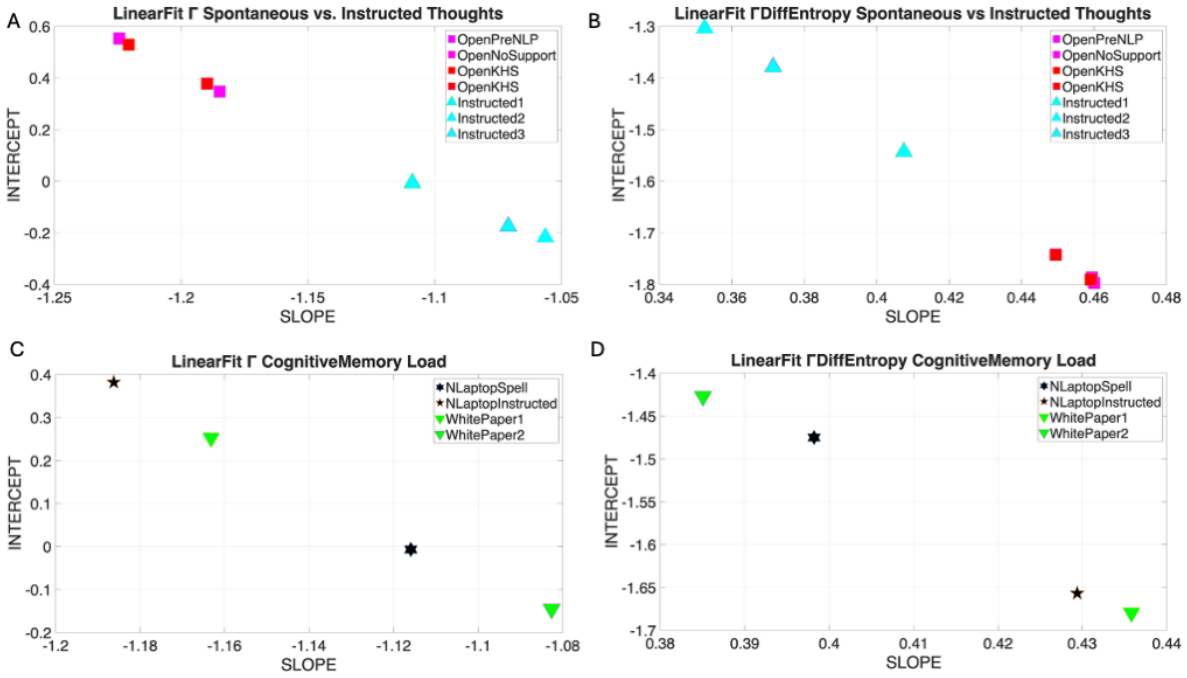

图12. 打字所体现的交流作者身份运动特征。(A) 对身体各部位经验估计的伽马参数进行双对数线性拟合。红色和洋红色方块表示针对开放式问题，自发打出（并说出）的短语；青色三角形则表示在指令下，有意打出（说出）的相同短语。(B) 经验估计的双对数 Γ 微分熵与 Γ 形状的线性拟合斜率和截距的类似表示。(C) 指令条件下的认知负荷。注意Γ 参数特征的范围很广，以及 (D) Γ 微分熵。

对于 CRP，在 FC 条件下观察到最高值（**图11C** 中间面板）。这表明，当打字者打字时将手搭在 CRP 的手上，CRP 的手腕呈现出难以预测的模式。这解释了 CRP 在 FC任务中的主体性指数值较低（**图11C** 最后一幅面板），也与 Γ 微分熵的范围相吻合（**图11B**），且后者与 Γ形状呈正相关（见公式 4）。**补充图14**上方面板展示了 FC 条件下打字者打字时，支撑其右手（优势手）的 CRP 右手腕（优势侧）的主体性与 Γ 微分熵之间的关系。请注意，CRP 在 FC任务中的主体性值较低。相比之下，下方面板显示，在 FC 条件下使用遮挡键盘时，打字者前臂上的传感器（引导手部动作）的主体性值较高；而他自发打字回答开放式问题时，主体性值最高。在认知负荷较高的指令性任务中，这些值会降低。毫无疑问，前臂上的传感器在所有测定中都能反映打字者的主体性。接下来，我们将介绍相关随机分析的结果，说明这些关系和参数范围如何形成规律，使我们能够简化所有这些计算，将其归结为少数几个参数；只要知道其中一个参数，就能以很高的把握推断出另一个参数，从而降低计算复杂度。

3.2 伽马随机表征自动区分各条件下的运动，从而区分自发与指令式实验中的认知负荷

在不同条件和身体部位下，基于三维物理位置数据得出的线速度时间剖面中微峰（MMS）的连续概率分布函数族，在最大似然估计意义上拟合效果最佳。我们使用形状参数和尺度参数来刻画各条件下的连续随机过程。它们在双对数参数平面上的位置揭示了线性关系；微分熵与形状参数之间也存在同样的关系。补充表1报告了 12 种情形下两项线性回归的拟合斜率、截距和拟合优度值。

3.3 通过运动特征显现的心理过程，可区分自发主动发起、用于回答开放式问题的短语与按照指令执行相同提示短语时的生物力学执行

图12A-B展示了系统如何自动区分两种交流方式：通过打字回答开放式问题，与按照指令打出相同短语。此处使用的是熟悉的键盘，并伴有熟悉的CRP（参见**图5、图6和图7-**左侧面板中，用于回答开放式问题的自发打字所对应的代表性物理运动轨迹，以及**图 7**右侧面板中代表性物理运动轨迹所对应的指令性打字。自发打字和指令性打字的情况还采用了其他物理运动轨迹数据，共计96 Γ 个概率密度函数，12种条件×8个传感器）。

3.4 认知、情绪和记忆负荷重新激活了身体非优势侧（在按照指令打出提示短语时处于休眠状态）

图12的C-D面板展示了认知、情绪和记忆负荷较高时，不同情形之间的自动区分。倒置的绿色三角形表示FC情形：一个熟悉的口袋大小字母板被一张白纸完全盖住，遮挡了所有字母。在不同程度的认知负荷下，对关节所有内禀旋转的控制与协调，使末端执行器（手部）在外在空间中进行平移和旋转，呈现出流畅的运动轨迹，并伴有口语短语。

身体非优势侧的运动轨迹逐渐汇聚至手部动作和心理思维过程，并在开始打出针对开放式问题的回答短语之前起到铺垫作用。当指令要求输入同一个短语时——其他条件均相同（同一位伙伴、熟悉的键盘、相同的桌椅布局）——身体非优势侧便进入休眠状态（参见**图 7**右侧面板中的运动轨迹）。生物传感器在物理空间中捕捉到的这些生物力学运动轨迹差异，映射到了抽象的Γ 流形中。

对数-对数Γ 尺度（NSR）与Γ 形状，以及对数-对数Γ 微分熵与Γ 形状之间的斜率与截距，清晰地揭示了这些自发开放式短语与指导（提示）短语之间的明确区分。

这些以线速度曲线为特征的位置数据的随机表征，与对陀螺仪记录的旋转所反映的角速度进行的交叉相干性、能动性、近似熵、传递熵和微分熵分析相一致。**补充图14**展示了FC期间的系统性差异（CRP手腕的能动性较低，而打字者前臂的能动性较高）。同样，在自发开放式（独立）打字期间，打字者的能动性较高；相比之下，他在指导性打字期间的能动性较低，而在认知负荷下则更低。

表1中认知负荷的变化对身体的物理轨迹产生了差异性影响。较高的认知负荷促使身体非优势侧自发重新参与，此前在低认知负荷的指导性打字期间，该侧一直处于休眠状态。具体而言，正如自发与指导短语之间的差异一样，在更高的认知负荷和记忆负荷下，Γ-PDF和Γ 微分熵参数的斜率平面与截距平面自动揭示了显著的身体差异。

3.5 伽马流形费舍尔-饶度量与测地线路径区分自发开放式与指令性运动特征

这是临时文件，并非最终排版文章

我们探究了伽马参数在其张成的曲流形上的分布。为此，我们采用费舍尔-饶度量，并追踪经验拟合优势手与非优势手的概率密度函数之伽马参数之间的距离。

这项距离针对全部 12 种情况进行计算，顺序与会话期间各条件出现的顺序一致。**图13A**展示了实验条件下（不包括热身组块）右手（优势手）与左手（非优势手）之间 FR距离的变化过程。**图13B**左侧展示了伽马流形上行进距离最长（对开放式问题的自发短语）和最短（指导短语）的测地线路径，两项分析的分配时间相同。右侧面板展示了指导性打字中认知负荷较高时对应的测地线。遮挡键盘条件下（绿色测地线），该短语两次重复时的路径一致。**图13C**呈现了优势手和非优势手走过的弯曲路径长度之间的物理距离。其变化趋势与伽马随机域中的 FR距离相似。

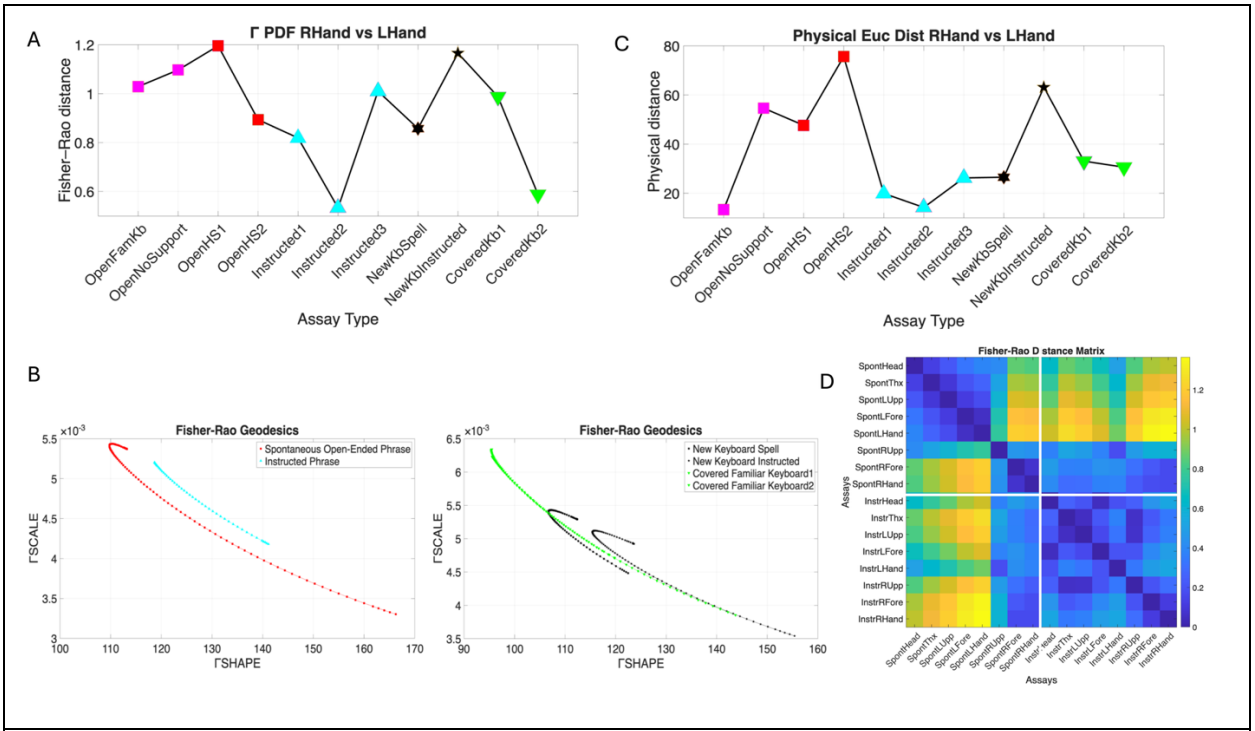

图13. 随机 Γ 流形轨迹与三维物理轨迹的几何分析。(A) 在所有会话、热身适应和实验条件下，右手与左手的经验值Γ 概率密度函数参数之间的Fisher-Rao距离（无单位）。(B) 左图为自发开放式（红色）与指导短语（青色）的测地线路径；右图为不同认知、情绪和记忆负荷下的指导短语（黑色表示使用新键盘与新搭档拼写单词，与指导的完整短语对比；绿色表示熟悉的CRP，但使用遮挡键盘）。(C) 右手和左手所描述的弯曲运动轨迹路径长度之差的物理距离（厘米）趋势，以二者的绝对差值表示。(D) 自发条件与指令条件下，身体各部位两两之间的FR距离。请注意，指令条件下的概率密度函数彼此相似（距离较近，呈蓝色），而自发条件下优势手与前臂的FR距离较远。还请注意，所有指令条件与自发条件之间的FR距离也较远。

所有 8 个传感器在自发条件和指令条件下的成对FR距离，展示了身体优势侧与非优势侧在这两种条件下的差异。指令性打字（右下方区块）在身体两侧仍表现得更为相似（蓝色调），而针对开放式

对开放式问题的回答中，优势手一侧的差异更大（黄色色调）。跨条件比较（右上和左下区块）显示，在整个指导性打字过程中，自发打字时身体非优势侧与所有传感器之间的距离较大。

3.6 伽马流形费舍尔-饶度量和测地线路径区分指令性打字过程中的认知-记忆-情绪负荷水平

不同认知负荷下指导性打字的运动特征生成了不同组的Γ-概率密度函数。**图8**表示高认知负荷条件（不同的键盘、提示者、无触觉支持）。沟通伙伴采用两种提示方式进行拼写：一种通过自然拼读，另一种通过拼读字母。轨迹捕捉了测定过程的连续流动。**图9**展示了指导短语情形，该情形可在**图12**中区分（拼写对应黑色六边形，指导短语对应黑色五边形），分别代表拼写与完整短语。

图13A展示了不同认知负荷水平下优势手与非优势手之间Γ-概率密度函数差异的FR距离值，而**图13B**展示了相应的测地线路径。**图13C**展示了双手之间的弧长物理距离差异，该差异与A面板中的FR距离相对应。

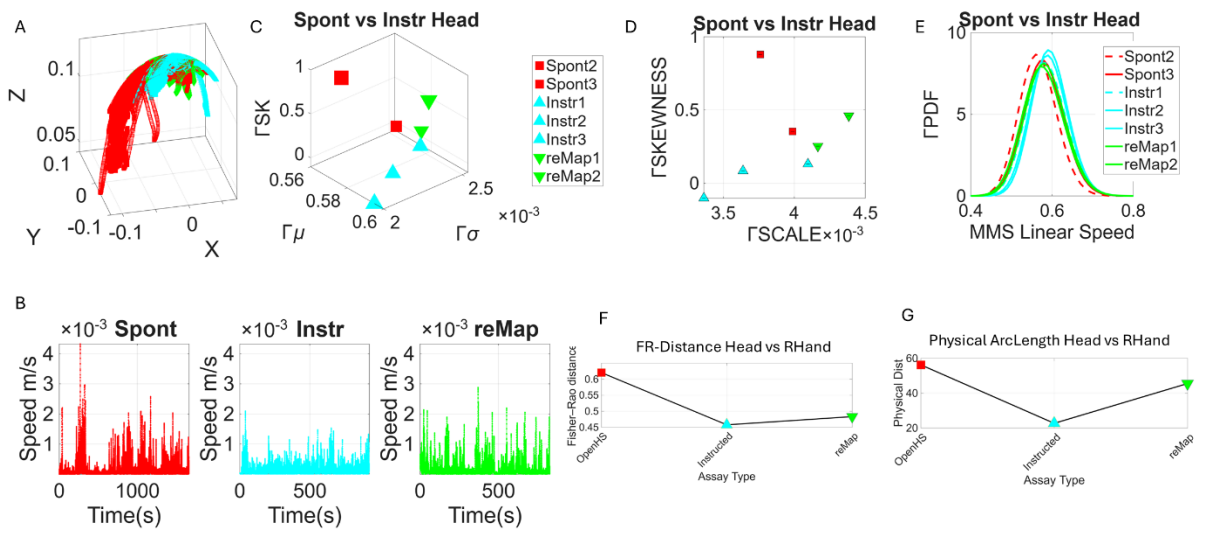

图14。头部物理与随机伽马轨迹呈现一致趋势，并能自动区分对开放式问题的自发回答、对同一开放式短语的指令性打字，以及在更高认知负荷下从回归FC进行辅助打字的反应。（A）三种不同条件下具有代表性的头部三维位置轨迹（米）：通过自发打字回答开放式问题（红色）；针对开放式问题，以指令性打字输入同一短语（青色）；通过在手部触觉辅助下回归辅助打字来增加认知负荷，但键盘被遮挡，因此需要重新映射视觉输入以回忆字母布局（绿色）。（B）相应的线速度时间剖面。（C）Γ 矩对应于每种条件下具有代表性的试次。（D）Γ NSR与Γ 偏度的相应投影。（E）经验Γ 概率密度函数。（F）头部到主要（右）手打字的Fisher-Rao距离。（G）相应的物理距离，即头部与右手路径长度之差的绝对值。

3.7 仅凭头部轨迹即可追踪伽马流形和三维物理空间中的差异

来自上半身的数据，包括头部、胸廓、上臂、前臂和手部，显示出不同条件下表现存在明确差异（图13D）。随后，我们询问仅凭头部是否可以作为一种

这是临时文件，不是最终排版文章

区分认知努力与作者身份的替代指标。为此，我们考察了不同条件和认知负荷水平之间在 Γ 流形上的 FR距离，以及物理空间中的 FR距离。

图14展示了可穿戴传感器捕捉到的不同头部运动轨迹：对开放式问题的自发回答与指令条件下的回答占据了三维物理空间中的不同区域。此外，遮挡硬纸板并需要重新映射按键布局、用一根手指打字所带来的额外认知负荷也反映在这些轨迹中。在Γ矩空间中，不同认知负荷水平下，自发回答开放式问题与指令条件下回答的随机性特征呈现出不同的分组方式。这些差异相对于手部的情况见**补充图8**。可以看到，头部特征更接近非优势手。**补充图9**展示了由前两个矩张成的平面上的FR测地线Γ。可以看到，指令条件下的低负荷与高负荷（黑色标记）沿着共同的测地线分布于不同的 水平位置（高负荷的红色和青色边缘对应较高方差和较低均值）。MMS微峰值较低表示平均原始速度较快（公式 10）。在促进性沟通（FC）中，使用遮挡键盘时的轻度认知负荷（洋红色）位于中间位置，但偏离了测地线路径。这项任务对一个旧有的（共享）双人运动程序有更高的长期记忆负荷。指令条件下的测地线路径（黑色）与开放式问题条件下的路径（蓝色）不同。

图14D是一个投影平面，用于概括 Γ NSR 与 Γ 偏度之间的关系（另见**补充图10**）。我们注意到，随着微峰的增加和减少，所解释的 Γ NSR 也更高。微峰减少对应着认知负荷增加时平均头部速度的提升（此时归一化公式 10 的分母更大，因此会对分子以及整体 MMS 波动施加更大的惩罚）。这也会影响偏度（**图14D**），使其从 0（对称情况）正向偏移，形成更重的右尾。这表明，微峰的较高波动并非单纯的离群值，而是随着认知负荷和记忆负荷的增加，更频繁地出现。这些现象分别源于键盘遮挡（这要求对按键布局进行心理重新映射），以及通过 CRP 提供的手部触觉辅助和双人能动性交换，重新回归到手部的 FC运动。

图14E显示了 Γ概率密度函数的变化，而**图14F-G**显示了 FR距离和头部与右手之间物理距离的相应变化。FR距离沿着Γ 流形上的测地线计算，而物理距离则沿着三维物理空间中头部与右手运动轨迹的弯曲弧长计算。从回应开放式问题时的自发短语过渡到有意指令短语，以及将这些情况与认知和记忆负荷更高的情况进行比较时，各项趋势相似。每项测量均为 11 个条件的平均值（4 个开放式问题、3 个指令条件，以及 4 个认知和记忆负荷各异的条件）。

3.8 反应潜伏期在开放式条件下区分认知努力与语义作者身份

开放式问题和带有认知负荷的指令条件下都存在认知努力。由于这两种情况下认知负荷都会渗入运动编码，因此区分其中的运动差异至关重要。在开放式问题中，驱动系统的是创造性思维，而非对提示短语的机械重复；这一点有何突出之处?

到目前为止，我们考察了身体非优势侧的作用：当优势侧同时执行打字动作时，身体非优势侧处于有意识觉察之外。在这里，我们考察优势手表现方面的差异。为此，我们分析了提出开放式问题或要求输入提示短语后1秒内的右手运动延迟。对于指令任务，我们分别设置了低认知负荷（熟悉环境）和轻度认知负荷（遮挡键盘并回归FC）条件。我们用青色标出经过1秒缓冲期后的90秒表现，并比较这些运动。所有传感器都同步记录数据，因此我们可以同时考察右优势手、左非优势手和头部运动轨迹。

考虑到不同条件之间存在差异，这种为每种情况分配固定延迟的方法使它们具有可比性。对于开始打字所需时间长于立即开始打字的情况，这种方法提供了足够的动作数据，以部分完成打字任务。我们运用三维曲线微分几何的技术，得到了Frenet-Serret移动标架。这是一个三维参照系，由曲线的切向量、法向量和副法向量组成。随着手部沿曲线平移和旋转，这些向量沿曲线变化，从而提供曲线曲率、挠率、速度（弧长）和加速度的度量。**图15**展示了优势手、非优势手和头部运动轨迹上的示例。

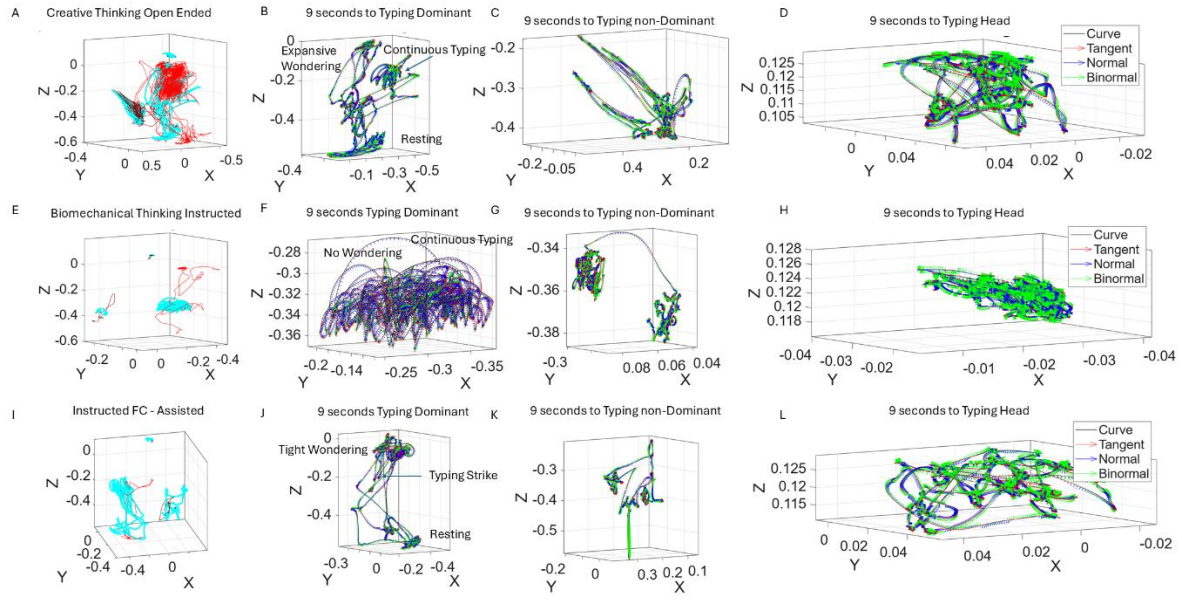

图15. 延迟反应可区分语义作者身份与认知努力。(A) 自发进行创造性思维以回答开放式问题，突出显示提问后一秒开始的90秒片段（青色）。(B) 使用沿轨迹的 Frenet-Serret 移动标架（切向量、法向量和副法向量，用于计算曲率、挠率、曲线速度和曲线加速度），放大观察这9秒内优势手的运动轨迹。请注意，运动解析空间中的区域结构包括：手放在键盘下方休息、在脸部附近进行思索式创造性思维、准备回答，最后在键盘上打字。(C) 非优势手的运动，发生在意识之外。(D) 头部运动。(E) 指令条件：提示打字者说出其在(A)中表达的同一句话，并标记指令后一秒开始的9秒内的轨迹。这显示出截然不同的打字风格。(F) 指令一秒后（如A所示），打字者打出了该短语，没有任何创造性思索动作。(G) 非优势手的运动模式与C截然不同，轨迹也更短（~4厘米，而C中为40+厘米）。(H) 头部运动。(I) FC 条件：使用遮盖的单指敲击键盘，提示打出该短语，并从指令后一秒开始记录9秒（青色）。(J) 放大后可见，打字者每个词敲击一次，同时进行涂鸦式思绪活动，可能是为了重新映射键盘并应对回归FC。(K) 非优势手的运动轨迹比开放式情境中的更短（~25厘米，而开放式情境中为40+厘米）。(L) 头部运动。

动作的延迟呈现出三种截然不同的模式，分别对应开放式、低负荷指令动作和轻负荷指令动作。在开放式情境下，打字开始的时间明显晚于另外两种条件。参与者一边构思答案，一边以创造性思维模式对其进行阐述，思考过程清晰可见。这包括一系列思索动作：参与者在思考时，优势手在脸部附近或身体静止区域周围活动，并向近体空间扩展。我们将这些动作称为思索动作，因为它们代表着

这是临时文件，并非最终排版文章

认知溢出，但其时空特征能够将创造性思维与高认知负荷状态区分开来。

在创造性情境下，沉思轨迹范围广阔，占据近体空间中更大的区域（**图15B**）。这些创造性的沉思轨迹不同于轻度负荷条件下的轨迹，后者紧密集中在一个点上（**图15J**）。在使用熟悉的键盘、熟悉的CRP和熟悉的提示方式的低负荷指令条件下，沉思动作完全消失。认知需求较低时，参与者直接开始打字（**图15E-F**），并在90秒内打出提示短语的大部分内容（**图15F**）。相比之下，在其他条件下的90秒内，他的沉思思绪会渗入优势手动作。然而，这种渗入各不相同，揭示了从头创作短语与借助FC辅助重新组织遮挡键盘的心理地图、以打出同一短语之间的差异。我们注意到头部轨迹和Frenet-Serret移动标架的差异（15D开放式、15H轻度负荷、15L低负荷）。**补充图15**进一步阐释了这一点，并展示了在完整的100秒延迟期间，Γ尺度与时间单位之间的差异，以及相应的路径在与平面上。

$$\Gamma\mu \qquad \Gamma\sigma^2$$

在开放式情境中，MH 在思索结束后输入了短语的一部分（见**图15B**箭头所指的击键片段）。也就是说，他完成了对创造过程的阐述，随后输入新短语，没有再回到思索状态。相比之下，在轻度负荷指令情境中，在规定的90秒内，他间歇性地敲击遮挡键盘，并回到面部附近以及静置区域（桌子附近）的狭小范围内做思索动作。他在FC辅助下只敲击遮挡键盘3次，每次敲击后，他说出短语的一部分，并将手移回面部区域；他的手在思考时紧紧垂落于此，随后再开始下一次FC辅助击键。在轻度负荷指令情境中，即使需要重新映射键盘并回溯童年记忆，以调用那些辅助运动程序，打字前也不会出现大幅度的思索动作。低负荷指令性打字没有思考的铺垫，打字动作会立即开始。

4 讨论

本研究提出了一种新的综合测定方法和一套生物特征指标，用于确立通过打字进行交流时，创造性创作与认知努力的运动指标。我们的案例研究结果显示，身体非优势侧在很大程度上不受打字者和CRP的意识觉察，却能凸显认知负荷的差异：当打字者自发回答开放式问题时，与提示其输入短语、从而让其刻意按指令打出同一短语时，两种情况下的运动轨迹有所不同。身体非优势侧运动轨迹的显著差异表现为：在低认知负荷的指令性生物力学打字过程中，该侧处于休眠状态；而当我们在刻意指令打字中增加认知负荷时，该侧则会重新充分参与。通过三维空间中的物理运动轨迹以及Γ-流形的抽象测地线，身体非优势侧清楚地展现了开放式问题所伴随的创造性思维类型，以及在提示输入同一短语时所伴随的生物力学思维。那么，优势手在执行有意打字动作时发挥什么作用？

语义所有权与认知努力：在创造性思维过程中，无论是在开始输入新短语之前还是输入期间，优势手的作用都十分明显。在这种条件下，Γ 矩空间中的特征沿着不同的 FR测地路径展开（另见**图14C**和**补充图9**中的头部特征）。通过由 Γ- 参数平面和微分熵所涵盖的尺度幂律关系的斜率和截距，可以自动区分自发开放式实验与审慎的指令式实验。**图15**也通过放大**图 7**中同一短语打字动作前90秒的实体三维轨迹，说明了这一点。对涉及 Frenet-Serret 移动标架的三维曲线进行详细几何分析，量化了两种实验中同时展开的语义所有权，包括优势侧（有意动作）和非优势侧（自发动作）。在运动的前90秒内，开放式创造性思维通过优势手的游移而展开；相比之下，指令性动作几乎已完成该短语的输入，且没有游移的前奏。

促进性沟通中的所有权：回归童年时期的促进性沟通模式，我们考察了运动主体性的标准化指数：分子为每项实验的 ΓSNR，分母为该项实验的 ΓSNR 与近似熵水平之和。随着近似熵增加、动作变得难以预测，主体性随之降低。我们发现，在促进性沟通期间，她的 CRP 近似熵水平压过了她的主体性水平。随着她的主体性水平降低，她必定放弃了控制，转而被动依赖打字者的手。相比之下，在这种辅助打字过程中，打字者前臂上的传感器带动手部，其主体性水平更高，对近似熵的预测能力也更强（数值更低）。标准化主体性指数与 Gamma 微分熵之间的关系也证实了这一点。结合身体非优势侧所传递的自发性或审慎性水平，或打字时认知负荷水平等（并不显而易见的）模式，这些生物特征指标为追踪通过打字进行交流时的学习过程进展提供了新方法。这一点十分重要，因为对辅助沟通的严厉批评已使这些方法的教学停滞，甚至完全中止；而在学习初期，这些方法需要触觉支持，以帮助学习者控制眼—头—躯干—手臂—手部协调，从而成功指向并及时选中目标。

4.1 辅助打字的新路径

这里的生物特征指标和测定为学习在支持下进行打字提供了新的途径，因为它们不带偏见且具有客观性。它们能够明确揭示打字者和CRP的能动性水平。本研究的参与者是一名高级打字者，他能够朗读自己打出的内容，因此，他的表现提供了一种直接核实信息的方式。然而，这里介绍的检测和生物特征指标具有普适性，适用于任何交流水平和任何类型的打字风格。仍需要沟通伙伴提供触觉支持的新手，无论沟通伙伴是握住其手，还是握住一块供打字者拼写以进行交流的板子，或是指向一张纸等，也可以在**图3**所示的测定中提供产生的运动数据。结合身体非优势侧、打字手臂和支撑手的数据，可以形成一套完整的方法，用于追踪二人组中的能动性、自主性和控制水平。如果CRP提供了过度支持，导致打字者的主体性指数下降，我们可以提醒CRP减少干预，让打字者主导过程。传递熵、近似熵、Γ微分熵等指标能够使我们具备这种能力。因此，按照适当的支持程度跟踪学习打字的过程是可行的。

我们谨此提醒，生物特征指标和检测并不能说明某个特定的人拥有这条打出的信息。它们只是指出，这些运动在多大程度上与认知努力或创造性思维相关。初学者首先必须学会掌控自己的动作、自我调节这些动作，并流畅地驾驭运动中的自身身体所固有的内在与外在感觉运动来源。这些生物特征指标和检测将帮助初学者实现这一目标，因为它们以个性化的方式客观且不带偏见地测量表现。它们测量个人的表现，以保护其免受他人过度控制，并促进运动交流迈向完全自主。通过揭示在这种二元互动中谁以能动性发挥主导作用，我们为以尊重且人道的方式加速学习过程提供了可能。

MH 的案例为我们提供了一个上限，使我们能够衡量与之的差距，并帮助他人以具体的更高层次目标开启这段旅程。我们知道目标何在，现在也有了严谨的方法，可以朝着那个方向前进。这项工作诚邀大家加入我们，以前所未有的严谨、透明与善意携手合作。作为出生时发育历程漫长的晚成性哺乳动物，我们每个人最初都曾得到祖先的帮助。这是大自然帮助我们茁壮成长的方式；但更重要的是，这是我们的权利，因为我们活着。

4.2 一个有益的类比：展望未来

在支持下学习打字的过程，类似于脑机接口（BCI）或脑机接口（BMI）的运作过程：利用脑信号学习控制外部设备（例如，计算机屏幕上的光标[53] 或机械臂[72, 73]）。在这类辅助学习情境中，计算机算法扮演 CRP 的角色，而脑信号则代表打字者的指向的手。在辅助打字的初始阶段，CRP 会大幅引导打字者的手指向所需的字母。打字者的贡献微乎其微，甚至为零。这就像在学习初期，由算法而非脑信号移动光标

这是临时文件，而非最终排版文章

或机械臂，以校准反馈控制回路。随着时间推移，CRP 会稍稍放松对打字者手部的控制，让打字者从错误中学习。同样，脑机接口算法会让脑信号参与控制光标或机械臂，而大脑则从自身的错误中学习。最终，算法和脑信号各自拥有 50% 的控制权（由算法或脑信号控制光标或机械臂，就像抛硬币一样随机）；然后是 60 比 40，再到 70 比 30，等等。最终，脑信号将获得对外部设备的 100% 控制权，并学会以充分的能动性控制它。同样，CRP 可以完全放弃控制权，将其交给打字者，使其获得充分的能动性，即使字母板仍由 CRP 扶持，或打字者的手仍需要支持。CRP 能动性较低、由打字者掌控流程的被动支持不仅是可能的（正如我们在这个例子中所看到的），更重要的是，它可以通过多种可靠的方式量化，而不依赖观察者带有偏见的观点或意图。对于不可避免地需要触觉支持的打字者，我们有了一条新的前进道路。

4.3 物理表现的随机等价性

身体动作产生的随机变化，通过弯曲的Γ 参数流形上的FR距离度量以及三维物理空间中的FR距离度量，得到了恰当的测量。在抽象Γ 流形和物理空间中，根据距离度量，这些变化呈现出一致性。在这两个空间中，随着认知负荷增加，优势手与非优势手之间的距离往往会增大；而在提示性指导下，距离则会缩小。然而，在接受指导且认知-记忆-情绪负荷较高时，距离往往又会增大。这些变化也以非优势手为参照，展现了一种新颖且不显而易见的方法，能够利用运动特征量化认知负荷，而且这种方式无法由外部人员有意控制。从这个意义上说，这些变化为衡量我们在自发阐述和提示性指导下的认知思维作者身份提供了一种新方法。

4.4 实用性与可扩展性：作为身体替代指标的头部运动

这一发现的实用价值与头部运动有关。仅凭头部运动，就能捕捉认知负荷和意图方面的这些差异。因此，头部运动可作为身体各部位运动特征的替代指标，并可通过视频等简单、无干扰的方式捕捉。鉴于身体优势侧与非优势侧之间心理觉知水平存在量化差异，且物理变化趋势与Γ 随机变化趋势具有高度一致性，我们提出，本文所述作为个性化创作主体性程度指标的认知负荷随机特征和物理特征，可以迁移并扩展至其他情形。

我们提供的这组测定方法可以适用于不说话的个体：通过视频和麦克风捕捉到的自发手势及任何自发发声，都可用于在审慎的指令模式下探测该系统。这些更细微的运动性发声信号仍然可以进行运动学量化。它们或许能让我们窥见不同系统中平滑肌和横纹肌的其他问题。通过对比手势、声音和面部表情中的自发性与审慎性，我们可以将认知负荷的运动特征与单纯生物力学表现的运动特征区分开来。这为我们提供了一种新方法，用于量化个体非优势末端执行器中的交流的创作主体性这一个体化指标。除了打字者的大脑本身之外，没有任何人能够在Γ 流形上复现与其在三维物理空间中的动作相对应的此类测地线。随后，优势手以个体独有的方式，为个体在打字动作之前自发产生的创造性思维增添独特、个性化且明确无误的所有权特征。这些特征与指导提示语句的打字之前所呈现的状态大相径庭——即便这些语句是在不同程度的认知和记忆努力下接受指导的。

4.5 通过测地线实现时空等价

我们的分析中最引人注目的结果之一，是时间特征与空间特征之间的等效性；这种等效性既体现在Γ 流形的测地线上，也体现在手部轨迹的弧长和时间延迟上。我们在固定时长内获取了不同条件下的运动轨迹（**图15 A-E-I**），据此提取每种情况下的运动距离和延迟。这些数据与不同条件下的Γ FR测地线相吻合（**图13, 15** 和 **补充图15**）。它们之间的差异提供了一种度量，涵盖了

与Γ 空间变化相对应的物理空间变化。后者能够捕捉从神经系统中同步记录的其他生物节律中微峰的一般性变化（**补充图4**）。从这个意义上说，这一结果使我们能够将这些发现推广到其他末端执行器和信号；因此，我们可以使用其他末端执行器（舌头、眼睛、面部、头部），获取在开始打字之前能够区分认知努力、生物力学努力和创造性思维的时空特征。

4.6 注意事项、迈向推广的路径与结论

这是一项关于一位口语能力正在发展的高级打字者的案例研究。我们将其视为上限，用于追踪并验证整体表现。我们需要扩大研究规模，并广泛抽样，涵盖在没有口语的情况下通过打字或指向进行交流的不同技能水平者。我们的方法提供了一种描绘躯体感觉运动系统特征的途径，可根据调节水平要求确定从何处着手（**补充图4**）。如今，借助我们的盒中实验室方法 [14]，我们能够以不显眼且大规模的方式开展这项工作。

MH的表现有其独特之处，这与他个人的打字、自我调节方式、学习历程和习得技能有关，但我们提出的测定方法和生物特征指标具有普适性。它们可以调整后用于评估新手打字者的学习情况；这类打字者无法说话，正在他人协助下学习打字。它们也可以用于评估更熟练、能够独立打字的人；这类人可能不需要太多支持，但同样无法说话。对于通过回声言语或自言自语／发声进行交流的个体，也可以采用相同的基本测定方法和生物特征指标进行调整。我们承认，这项工作仍须开展，以揭示非言语者群体中的广泛差异，并帮助加速他们的学习过程。但我们也提出了前进的路径：摆脱行为主义，转向一种赋予个体能动性的人道方法，同时帮助其进行自我调节并感到自在。

交流期间的感觉运动变异性和行为表现，与非言语型自闭症谱系障碍人群以及其他任何非言语群体（卒中、脑瘫等）一样，具有高度异质性。尽管如此，仍可使用本文介绍的方法对这些差异进行量化。这些方法不受信息内容或作者身份主张的影响。借助精确的时空生物特征指标，它们能够客观揭示在二元互动环境中谁以能动性发挥主导作用；同时，由于随机性和几何规则通过重要的参数识别简化了计算复杂度，这些方法可以嵌入手机并广泛推广。我们强调有必要将本研究扩展至其他群体，并提供相关指标，以安全地区分指令性打字过程中的认知努力程度与那些作为创造性思维打字前奏的运动。

5 利益冲突

作者声明，罗格斯大学与作者共同拥有与本研究相关的专利。这些专利未来可能为该大学和作者带来经济利益。

6 作者贡献

概念化：EBT；数据整理：EBT；形式分析：EBT；资金获取：EBT；调查：EBT；方法学：EBT；项目管理：EBT；软件、可视化与验证：EBT；原始稿撰写：EBT。

7 经费资助

本研究获得了 Nancy Lurie Marks Family Foundation 向 EBT 提供的职业延续奖，以及罗格斯大学向 EBT 提供的社会艺术与科学社区参与外部基金奖的资助。

8 致谢

这是临时文件，并非最终排版文章

感谢 Nancy Lurie Marks Family Foundation 对我们自闭症研究工作的支持。感谢 Matthew Hayes 和 Rene Hayes 与我们合作。感谢感觉运动整合实验室的所有成员和访客，在我们开展这一研究项目的过程中给予持续帮助。

9 张表

表1. 用于追踪作者身份等级的测定。

认知 load	**Low**	**Low**	**Mid**	**Mid**	**High**
测定 Used	开放式问题， 熟悉的键盘， 熟悉的CRP ， 熟悉的提示者，	指导短语， 熟悉的知识库， 熟悉的CRP ， 熟悉的提示者，	开放式问题， 熟悉的知识库， 熟悉的CRP ， 熟悉的提示器， 回归FC	开放式问题， 熟悉的知识库， 已涵盖 KB， 熟悉的CRP ， 熟悉的提示者， 回归FC	开放式 Q， 拼写 单词通过 自然拼读与字母， 新知识库， 新脑瘫， 陌生提示者
已保存 Data 流	视频/生物传感器	视频/生物传感器	视频/生物传感器	视频/生物传感器	视频/生物传感器

10 参考文献

1. Torres, E.B., *Torres*能动性学习方法：通过个性化具身学习策略，激发自闭症儿童和神经典型儿童的自主意志性运动控制。《Sensors（巴塞尔）》预印本，2026年。

2. Furnier, S.M., R. Gangnon, and M.S. Durkin, 不同适应功能和智力功能水平人群中自闭症患病率的时间趋势。《Autism Research》，2026年。 **19**(1): p. e70167.3. Shaw, K.A., et al., 一项基于人群的研究中重度自闭症的患病率及评估实践。《美国儿童与青少年精神病学学会杂志》，2026年。4. Bermperidis, T., R. Rai, and E.B. Torres, 平衡运动自主性与运动控制的社会运动能动性数字筛查工具。《人类神经科学前沿》，2024年。 **18**: p. 1442799.5. Nicoli, G., et al., 触碰可能减轻发育障碍人士辅助打字时的认知负荷。《整合神经科学前沿》，2023年。 **17**: p. 1181025.6. Nicoli, G., et al., 发育障碍人士在身体辅助书写的文本中作出了自己的风格性贡献。《儿童与青少年精神病学前沿》，2023 年。 **2**: p. 1182884.7. Jaswal, V.K., A. Wayne, and H. Golino, 眼动追踪揭示了辅助性自闭症沟通中的能动性。《科学报告》，2020年。 **10**(1): p. 7882.

8. Shefer-Kaufmann, N. and Y.S. Bonneh. 自闭症谱系障碍极少语言表达的年轻成人的读写能力：眼球运动揭示了这一点，指向却没有——一项试点研究。载于 国际自闭症研究学会，蒙特利尔，加拿大。

2019年。蒙特利尔，魁北克，加拿大：（2019）自闭症谱系障碍极少语言表达的年轻成人的读写能力：眼球运动揭示了这一点，指向却没有——一项试点研究。9. Ziv, I., 等，自闭症儿童的眼动随机性更高，且随症状严重程度增加。《Autism Research》，2024年。10. Torres, E.B. 和 K. Denisova，运动噪声是自闭症研究和药物治疗中的丰富信号。《科学报告》，2016年。6：第37422页。11. Ryu, J. 等，感觉过度反应参与者对躯体疼痛的个性化生物测量结果与心理物理学评估一致。《个性化医学杂志》，2021年。11(2)。12. Elsayed, M. 和 E.B. Torres，《自主神经系统专题》中的疼痛与痛苦心脏反应探索。2023年，IntechOpen。13. Elsayed, M.，《心理学》中的可解释生物测量框架：评估自闭症患者及普通人群的痛苦内部心理生理状态。2024年，新泽西州立罗格斯大学：新不伦瑞克，新泽西州，美国。第142页。14. Elsayed, M. 等，搭建我们的盒中实验室：为可扩展的个性化生物测量远程数据收集铺路。《个性化医学杂志》，2025年。15(10)。15. Bermperidis, T. 等，因果预测模型得出的最佳时间延迟有助于对神经系统病理进行分层和预测。《科学报告》，2021年。11(1)：第20904页。16. Torres, E.B. 等，《自闭症：微动作视角》。《整合神经科学前沿》，2013年。7：第32页。17. Torres, E.B., P. Yanovich 和 D.N. Metaxas，给自发性和自我发现一个机会：将自发的肢体末梢变异性作为引发中枢驱动的有意行为的替代指标。《整合神经科学前沿》，2013年。7：第46页。18. Emmons, K.A. 等，自闭症谱系障碍年轻成人的听觉注意部署。《自闭症与发育障碍杂志》，2022年。52(4)：第1752–1761页。19. Wang, Y. 等，听到自己的名字对自闭症儿童和神经典型儿童随后注意视觉刺激的影响：一项事件相关电位研究。《自闭症与发育障碍杂志》，2026年。56(4)：第1436–1447页。20. Key, A.P., P.J. Yoder 和 W.L. Stone，辅音辨别介导了自闭症谱系障碍儿童非言语能力与言语能力之间的差异。《智力障碍研究国际期刊》，2016年。60(5)：第478–90页。21. Andersen, R.A. 和 D. Zipser，顶叶后部皮层在视动整合坐标变换中的作用。《加拿大生理学与药理学杂志》，1988年。66(4)：第488–501页。22. Bernstein, N.A.，《动作的协调与调节》。1967年，伦敦：培格曼出版社。23. Feĭgenberg, I.M. 和 J. Linkova，《尼古拉·伯恩斯坦：从反射到未来模型》。《体育史研究》。2014年，苏黎世：Lit出版社。xiii，268页。24. Torres, E.B., Zipser, D.，用多关节手臂伸手抓取（一）：计算模型。《神经生理学杂志》，2002年。88：第1–13页。25. Von Holst E. 和 M. H.，再传入原理：中枢神经系统与外周器官之间的相互作用，载于《知觉加工：刺激等价性

这是临时文件，并非最终排版文章

以及模式识别 *e. Dodwell PC*，编者。*1950*年，*Appleton-Century-Crofts*：纽约。第*41–72*页。*26. Grillner, S.* 和 *A. El Manira*，《运动控制的当前原理：特别关注脊椎动物运动》。*Physiol Rev*，*2020*年。*100(1)*：第*271–320*页。*27.* 国际电工委员会 *(IEC)*，载于《医用电气设备——第*1*部分：基本安全和基本性能通用要求》。*IEC*。第*2012–08*页。*28. Quatieri, T.F.* 等，《量化极少言语型孤独症谱系障碍成年人的发声子系统》。《人类神经科学前沿》，*2026*年。*20*：*1695265*页。*29. Torres, E.B.* 等，《感知回声：听觉脑干反应中的时间错位是神经发育偏离的最早标志》。《*PNAS nexus*》，*2023*年。*2(2)*：*pgac315*页。*30. Miron, O.*、*A.L. Beam* 和 *I.S. Kohane*，《自闭症谱系障碍婴幼儿和儿童的听觉脑干反应：*V*波荟萃分析》。《*Autism Research*》，*2018*年。*11(2)*：第*355–363*页。*31. Delgado, C.F.* 等，《发育障碍儿童的新生儿听觉脑干反应》。《自闭症与发育障碍杂志》，*2021*年。*32. Miron, O.* 等，《对自闭症谱系障碍新生儿进行普遍听力筛查时出现的听觉脑干反应延长》。《*Autism Research*》，*2021*年。*14(1)*：第*46–52*页。*33. Delgado, C.F.* 等，《发育障碍儿童的新生儿听觉脑干反应》。《自闭症与发育障碍杂志》，*2023*年。*53(2)*：第*776–788*页。*34. Kandel, E.R.*，《神经科学原理》。第*5*版。*2013*年，纽约：*McGraw-Hill*。*l*，*1709*页。*35. Baizer, J.S.*，《支持脑干在自闭症中发挥作用的功能与神经病理学证据》。《整合神经科学前沿》，*2021*年。*15*：*748977*页。*36. Torres, E.B.*，《运动控制中的两类运动》。*Exp Brain Res*，*2011*年。*215(3-4)*：第*269–83*页。*37. Torres, E.B.*，《运动变异性的特征可根据意图水平预测手部速度》。《行为与脑功能》，*2013*年。*9*：第*10*页。*38. Torres, E.B.* 等，《新生儿诊断：迈向神经运动控制动态生长图表》。《*Front Pediatr*》，*2016*年。*4*：第*121*页。*39. Prechtl, H.F.R.*，《早产儿自发运动的定性变化是神经功能障碍的标志》。*Early Hum Dev.*，*1990*年。*23*：第*151–159*页。*40. Torres, E.B.*、*K.M. Heilman* 和 *H. Poizner*，《帕金森病患者内源性诱发的自动化伸手动作受损》。*J Neurosci*，*2011*年。*31(49)*：第*17848–63*页。*41. Galjaard, H.* 等，《脑瘫的早期检测与管理》。神经科学专题。*1987*年，多德雷赫特；波士顿欣厄姆，马萨诸塞州，美国：*Nijhoff*；美国和加拿大经销商 *Kluwer Academic Publishers*。*ix*，*151*页。*42. Prechtl, H.F.*，《全身运动评估作为发育神经病学的一种方法：新范式及其影响》。*1999*年 *Ronnie MacKeith*讲座。《*Dev Med Child Neurol*》，*2001*年。*43(12)*：第*836–42*页。

43. Einspieler, C. 等，日后发展为运动障碍型脑性瘫痪的早期标志不同于痉挛型脑性瘫痪的早期标志。《神经儿科》，2002年。**33**(2)：第73–8. 44. Ferrari, F. 等，早产儿拥挤同步的全身运动是脑瘫的早期标志。《儿科与青少年医学档案》，2002年。**156**(5)：第460–7. 45. Einspieler, C. 和 H.F. Prechtl，*Prechtl*全身运动评估：一种诊断工

l

用于幼年神经系统的功能评估。《智力障碍与发育障碍研究评论》，2005年。**11**(1)：第61–7页。46. Thelen, E. 和 L.B. Smith，认知与动作发展的动态系统方法。《麻省理工学院出版社/布拉德福德认知心理学丛书》。1994年，马萨诸塞州剑桥：麻省理工学院出版社。xxiii，376页。47. Thelen, E.，早期知觉运动发展变化的动态机制，载于认知发展机制：行为与神经视角，J. McClealland 和 R.S. Siegler 编。2001年，Lawrence Erlbaum Associates Inc.：新泽西州马瓦，美国；英国伦敦。第161–184页。48. Thelen, E，编。认知发展机制：行为与神经视角 卡内基梅隆认知研讨会丛书，J. Mc Clelland 和 R.S. Siegler 编。第I卷。2001年，Lawrence Erlbaum Associates Inc.：宾夕法尼亚州匹兹堡。161–184。49. Torres, E.B. 等，制定候选生物标志物策略，以刻画自闭症谱系障碍的女性表型。《神经生理学杂志》，2013年。**110**(7)：第1646–62页。50. Torres, E. 和 R. Andersen，猴避障学习过程中的时空分离。《神经生理学杂志》，2006年。**96**(5)：第2613–32页。51. Torres, E.B.，意向性曲线伸手动作的新对称性。《行为与脑功能》，2010年。**6**：第21页。52. Torres, E.B. 等，左侧顶叶后部皮层中的感觉空间转换可能有助于伸手动作时序。《神经生理学杂志》，2010年。**104**(5)：第2375–88页。53. Choi, K. 和 E.B. Torres，前额叶皮层中的意向信号可泛化至不同感觉模态。《神经生理学杂志》，2014年。**112**(1)：第61–80页。54. Ryu, J. 和 E. Torres，自主神经系统可区分不同水平的运动

r

意图与末端执行器。《个性化医学杂志》，2020年。**10**(3). 55. Torres, E.B.，确定受试者意志程度的系统和方法，载于*Google* 专利，美国专利商标局，编辑。2017年，10月19日，新泽西州立罗格斯大学：美国。第15页。56. Torres, E.B.，测量生理相关运动的系统和方法，美国专利商标局，编辑。2017年，6月8日，罗格斯大学：美国、欧盟（法国、德国）、英国。第1–21页。57. Torres, E.B. 和 T. Bermperidis，测量或修改数字交互中控制的技术，美国专利商标局，编辑。2024年，新泽西州立罗格斯大学：美国、欧盟。58. Nguyen, J. 等，探索自上而下视觉过程对运动行为影响的方法。《视觉实验杂志》，2014年(86)。59. Ryu, J. 和 E.B. Torres，认知负荷下感觉运动行为的表征：利用具身认知研究新统计平台。《人类神经科学前沿》。

，

2018年。**12**(116)：第1–19页。

这是临时文件，并非最终排版文章

60. Torres, E.B.、*J. Vero* 和 *R. Rai*，使用生物物理微运动尖峰进行个体化行为分析的统计平台。《*Sensors*》（巴塞尔），*2018*年。*18(4)*。*61. Lizier, J.T.*，*JIDT*：用于研究复杂系统动力学的信息论工具包。《*Frontiers in Robotics and AI*》，*2014*年。*1*。*62. Brooks, J.X.* 和 *K.E. Cullen*，预测性感知：运动信号在感觉处理中的作用。《*Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*》，*2019*年。*4(9)*：第*842–850*页。*63. Cullen, K.E.*，自生成运动和外部施加运动的神经编码：对自运动感知和空间记忆的启示。《整合神经科学前沿》，*2014*年。*7*：第*108*页。*64. Cullen, K.E.*，自然自运动期间的前庭处理：对感知与行动的启示。《*Nature Reviews Neuroscience*》，*2019*年。*20(6)*：第*346–363*页。*65. Cullen, K.E.* 和 *O.A. Zobeiri*，主动自运动的本体感觉与预测性感知。《*Current Opinion in Physiology*》，*2021*年。*20*：第*29–38*页。*66. Lee, J.*、*T.R. Darlington* 和 *S.G. Lisberger*，感觉运动行为中反应潜伏期的神经基础。《*Cerebral Cortex*》，*2020*年。*30(5)*：第*3055–3073*页。*67. Reverter, F.* 和 *J.M. Oller*，计算*Gamma*分布的*Rao*距离。《*Journal of Computational and Applied Mathematics*》，*2003*年。*157*：第*155–167*页。*68. Reverter, F.* 和 *J.M. Oller*，求解常微分方程初值问题的修正泰勒级数方法。《*International Journal of Computer Mathematics*》，*1997*年。*65(3-4)*：第*231–246*页。*69. Vero, J.* 和 *E.B. Torres*，*Fisher-Rao*距离检测认知负荷下运动学特征曲线的变化。*arXiv:2609.07696v1*，*2026*年。预印本。*70. Do Carmo, M.*，《曲线与曲面的微分几何》。*1976*年：*Prentice Hall*。*71. Mosimann, J.E.*，体型异速生长：具有对数正态分布和广义*Gamma*分布特征的大小与形状变量。《*J. Am. Stat. Assoc.*》，*1970*年。*65*：第*930–945*页。*72. Park, B.* 等，恢复感觉的神经假体技术趋势。《*Biomed Eng Lett*》，*2026*年。*16(5)*：第*1143–1164*页。*73. Cantillo-Negrete, J.* 等，用于认知康复的脑机接口：叙述性综述。《*Bioengineering*》（巴塞尔），*2026*年。*13(10)*。*11* 数据可用性声明

本研究生成/分析的数据集可在 Zenodo [https://zenodo.org/records/24432280] **数字对象标识符 10.5281/zenodo.24432280** 中找到