

An event-related potentials study of neural signals for perceptual decision making under uncertainty : A replication of O'Connell, Dockree, & Kelly (2012).

引言

决策变量

知觉决策的过程包括：感觉信息的瞬时编码(证据)、将证据整合到决策变量中(证据积累)，和做出决策(运动准备与执行)三个部分。决策变量随着一个决策可能是正确的概率单向增加，并在达到阈限时驱动行为。对猴子的单细胞记录研究发现了代表以上过程的神经信号，这些信号通过随着时间推移积累感觉证据来追踪决策变量，并在达到阈限时触发决策。这些决策变量的信号存在于猴子大脑的顶叶内侧区域(lateral intraparietal area, LIP)。

对猴子和其他哺乳动物进行的颅内电极的研究，使研究者开始想要探究人类的大脑中是否存在类似的知觉决策过程的神经信号。对人类知觉决策过程神经信号的研究不但能够揭示人类进行知觉决策的机制，也能够为解决脑损伤和老化对决策带来的影响提供参考。

O'Connell 等人总结决策变量的几个特征：(1) 索引感觉证据的时间整合；(2) 做出响应的的时间取决于证据积累达到阈限的时刻；(3) 只对目标感觉刺激的证据做出积累；(4) 独立于运动准备过程；(5) 在多种感觉通道下表现出一致的证据积累过程。



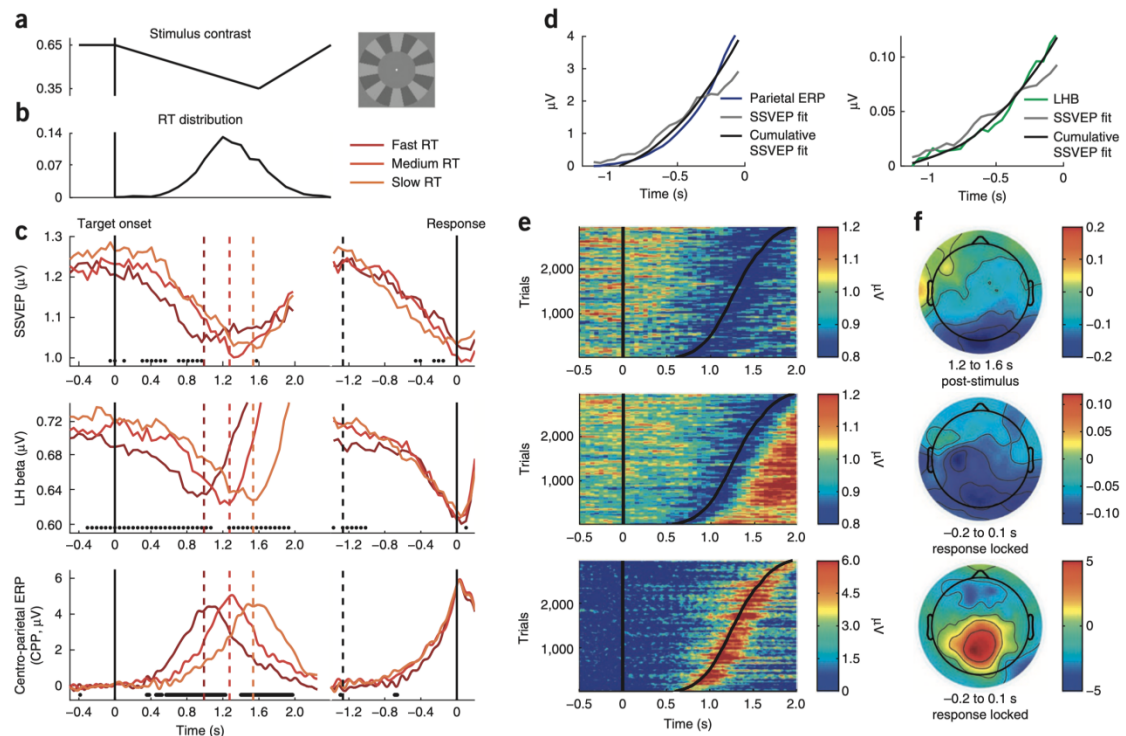
原研究

为了能够在不使用颅内植入物的方式分离出知觉决策证据积累的神经信号, O'Connell 等人设计了渐进目标检测范式(Gradual target detection task, GTDT),使用 ERP 技术记录头皮电信号, 将知觉决策中感觉信息编码和证据积累的神经信号分离, 发现了一个全感觉通道通用的证据积

累过程，无论感觉信息和刺激的特征如何，都表现出相同的决策预测动力学，即使在不需要做动作反应的时候也依旧能够进行证据积累。

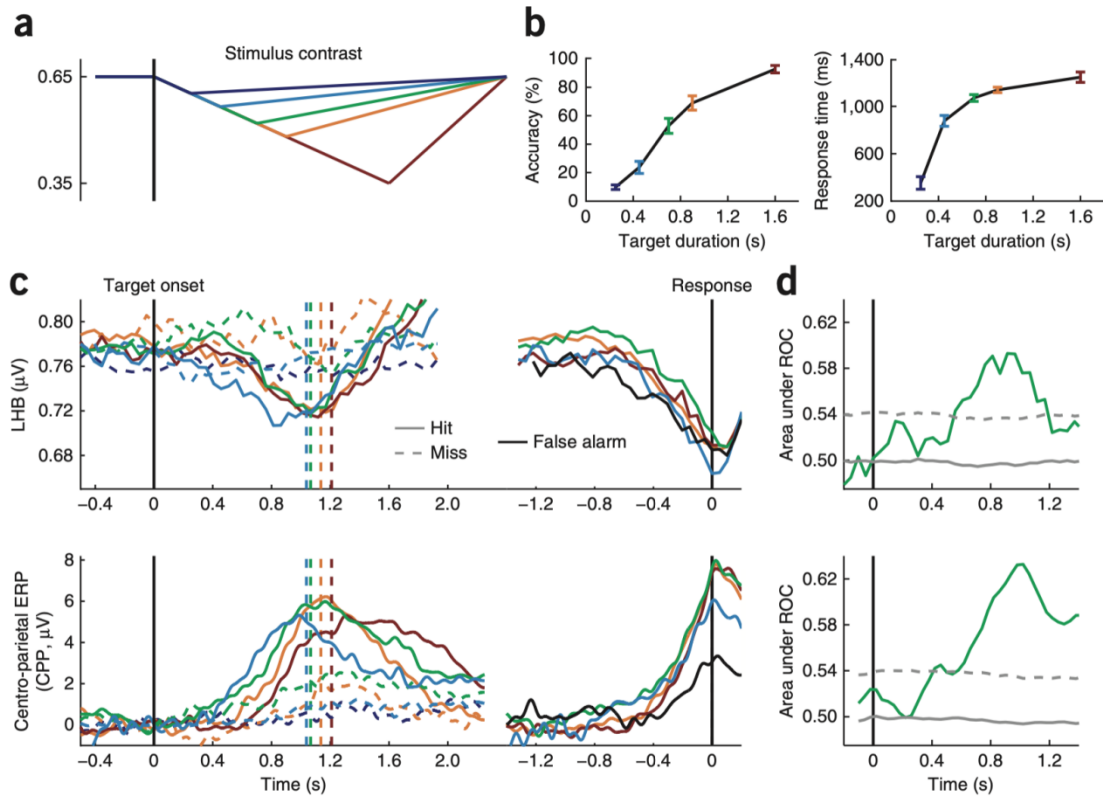
在 GTDT 任务中被试被要求检测持续刺激的单个特征的间歇性变化，通过快速闪烁关键感觉特征，在稳态唤起的响应中收集感觉信息瞬时编码的神经信号；通过连续呈现的刺激，避免了单个离散试次开始时诱发的瞬时感觉成分；通过让被试进行按键反应，持续收集知觉决策过程中运动准备的神经信号；通过检测持续刺激的单个特征的变化，模糊了试次间开始的时间，能够避免被试通过识别出明确的试次开始时间作为证据积累的依据。

在最初版本的 GTDT 任务中，被试被要求检测对比度间歇性降低的以 21.25Hz 频率闪烁的圆环，当被试察觉到圆环对比度降低时进行按键反应。在这个过程中收集到稳态视觉诱发电位 SSVEP（感觉信息编码的神经信号），运动-选择左半球 beta 节律 LHB（运动准备的神经信号）和中央顶叶正成分 CPP。分别对 SSVEP、LHB 和 CPP 的峰值波幅与反应时做回归，三种成分对反应时的解释率分别为 20%，85%和 90%。对于单个被试，分别使用 LHB 和 CPP 的波幅与 SSVEP 的波幅和 SSVEP 随时间积累量的波幅进行回归分析，发现与 SSVEP 积累量的回归的决定系数大于与 SSVEP 做回归的决定系数，说明 LHB 和 CPP 能够符合决策变量的第一个特征：索引感觉证据的时间整合。以反应锁时对三种成分的波幅分析发现，对于 LHB 和 CPP 成分，不论反应速度快慢，在做出反应的时刻，LHB 和 CPP 波幅达到固定的峰值，而 SSVEP 的波幅在做出反应的时刻与当前时刻圆环的对比度有关，说明 LHB 和 CPP 符合决策变量的第二个特征：做出反应的时刻取决于波幅达到固定阈限的时刻。

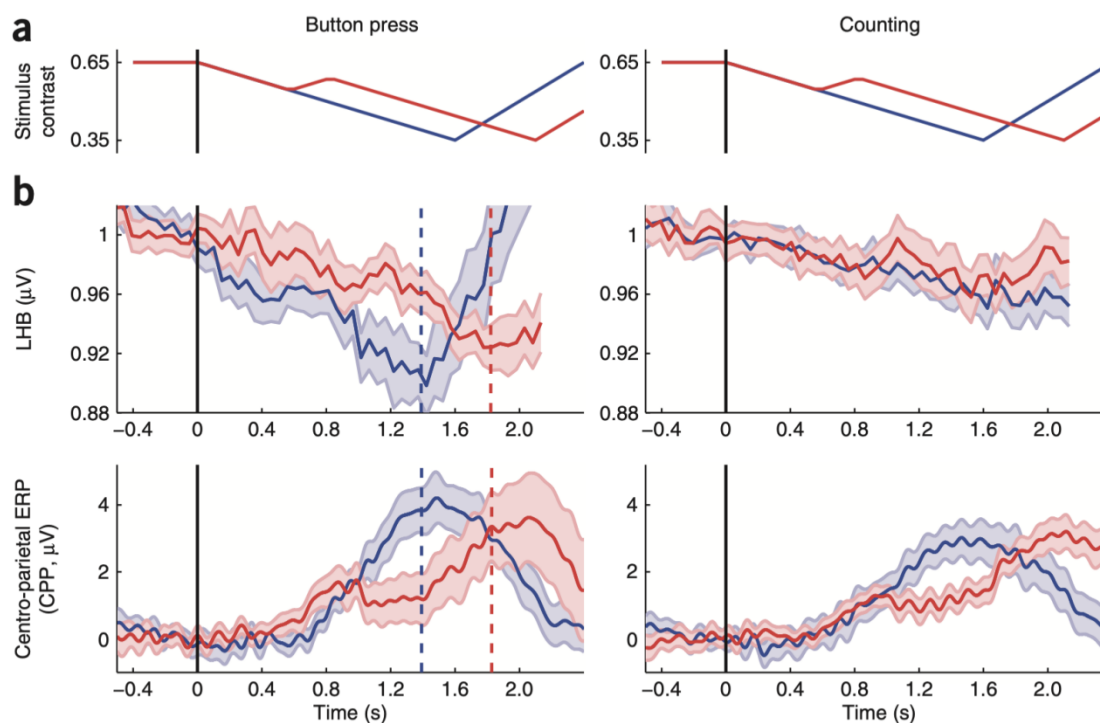


为了考察 LHB 和 CPP 是否符合决策变量的全部特征，O'Connell 等人改进了 GTDT 任务，考察知觉决策过程中的难度和干扰对 LHB 和 CPP 波幅的影响。在第二个版本的 GTDT 任务中，被试依旧检测对比度下降的 21.25Hz 频率闪烁的圆环，在识别出对比度下降的时刻进行按键反应。在这个版本的任务中，通过操纵对比度下降的程度和时间范围，将任务区分为五种难度档位：最难的档位，对比度下降程度最低，对比度下降的过程也最短，因此需要被试能够在更短

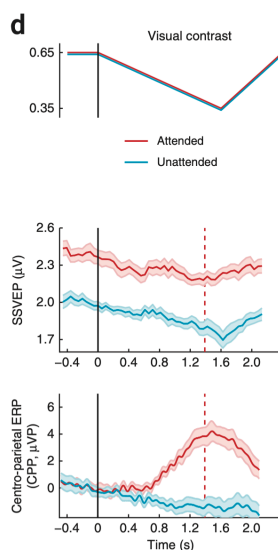
的时间范围内进行证据积累并做出响应；最容易的档位和最初版本 GTDT 任务难度相同，有最大的对比度下降范围和最长的对比度下降时间。被试做出按键反应时刻，CPP 的峰值波幅能够将正确响应（除最难档位外的其他四个档位）和虚报（中间难度档位）的结果区分开，而 LHB 的波幅峰值在正确响应（除最难档位外的其他四个档位）和虚报（中间难度档位）结果上是相同的，这暗示了 LHB 可能代表的是运动准备过程，是效应器特异性信号。



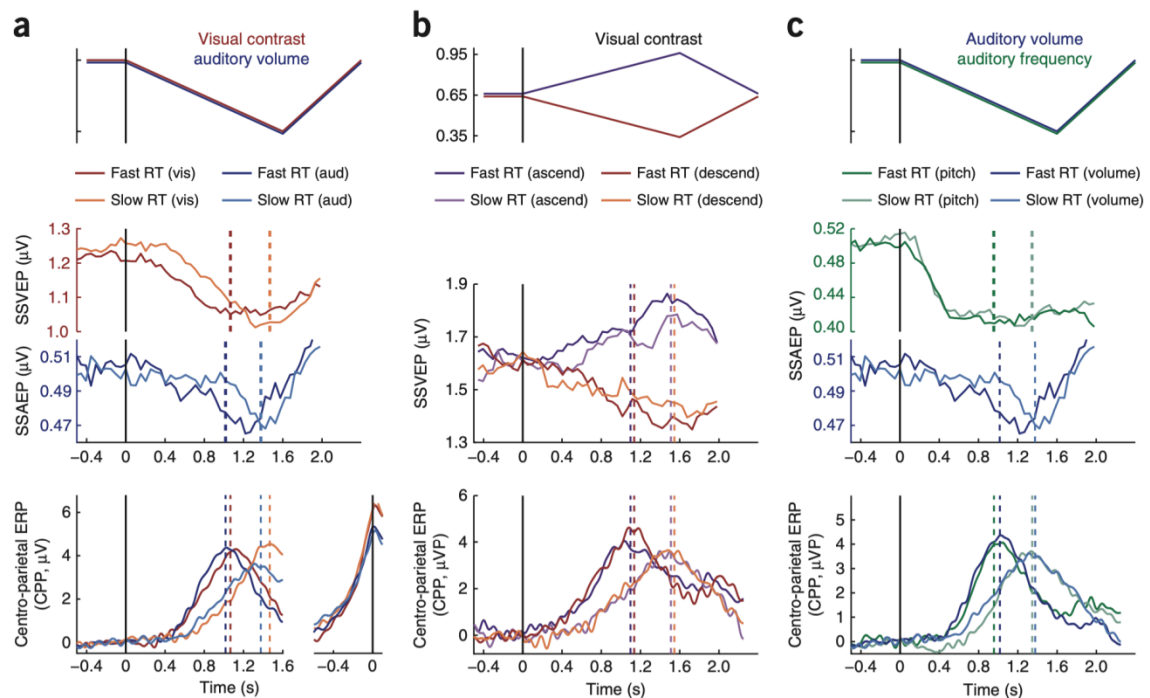
在第三个版本的 GTDT 任务中，圆环的对比度在下降的过程中会短暂回升并再次下降（干扰），被试依旧在识别出对比度降低时进行按键反应。LHB 和 CPP 波幅依旧在做出反应时达到峰值，但是达到峰值的时间随着感觉信息干扰而增加。为了进一步验证第二个版本 GTDT 任务中对于 LHB 仅代表运动准备过程，被试在第三个版本的 GTDT 任务还需要进行一个心算反应的实验组，在这个实验组中，被试察觉到对比度下降时不再进行按键反应，而是通过心算计数，在实验结束后报告总共检测到的对比度下降次数。在这个实验条件下，CPP 波幅依旧表现出 (1) 索引感觉证据时间整合和 (2) 做出响应[心算]的时间取决于证据积累达到阈限的时刻，LHB 波幅不再表现出证据积累的特征。说明 LHB 是效应器特异性信号，不能够反应证据积累的过程。



决策变量的最后一个特征是只积累目标刺激的证据，O'Connell 等设计了第四个版本的 GTDT 任务。这个版本的任务中和第一个版本的 GTDT 任务相同，唯一的区别在于圆环对比度下降的过程中，圆环后的背景正方形的图案会在随机的 100ms 内瞬时变大，被试需要检测到背景正方形变大的过程并迅速做出按键反应。在这个版本的 GTDT 中，闪烁圆环对比度的下降诱发了和最初版本 GTDT 任务中相同的 SSVEP，但无法诱发出 CPP 成分。说明被试依旧在编码感觉信息，但决策的过程发生改变，被试检测瞬时变大的图案，不再追踪圆环对比度的降低，决策任务不再表现出证据积累的模式，因此 CPP 消失，这个结果说明 CPP 符合决策变量 (3) 只积累目标刺激的证据的特征。



随后的几个版本 GTDT 任务通过改变感觉信息的通道（声音音量降低/声音频率降低/圆环对比度增加），发现 CPP 在不同的感觉通道都表现出决策变量的特征。至此得出结论 CPP 是全感觉通道通用的知觉决策中证据积累过程的神经标志物。



重复研究

O'Connell 等人（2012）的论文中虽然通过一系列实验发现 CPP 作为知觉决策中证据积累的神经标志物，但是在论文中并未报告具体的分析数据，因此本研究将对 O'Connell 等人的研究进行直接复制，验证 CPP 是否符合决策变量的特征。通过预注册报告的方式，在实验前确定样本量和效应量，实验流程和分析方法，确保实验结果真实可靠。

为了验证 CPP 作为知觉决策中证据积累的神经标志物，我们选择原研究中能够反映 CPP 具有决策变量特征的实验进行直接重复，使用与原研究相同的范式。我们决定重复最初版本的 GTDT 任务，心算条件的 GTDT 任务和注意力转移条件的 GTDT 任务。最初版本的 GTDT 任务能够反映决策变量：（1）索引感觉证据时间整合和（2）做出响应[心算]的时间取决于证据积累达到阈限的时刻的特征；心算条件的 GTDT 任务能够将 CPP 和代表运动准备过程的 LHB 区分；注意力转移条件的 GTDT 任务能够反映决策变量：（3）只积累目标刺激的证据的特征。

方法

样本量

O'Connell 等人论文中报告的第一个版本 GTDT 任务招募了 24 名被试（5 名排除），心算条件 GTDT 任务招募了 20 名被试（2 名排除），注意力转移条件 GTDT 任务招募了 20 名被试（2 名排除）。重复实验采用被试内实验设计，所有被试完成全部三个条件下的 GTDT 任务，因此选取第一个版本的 GTDT 任务被试数量 19 作为参照，根据“small telescope”方法，选取原研究 2.5 倍的样本量作为重复实验招募被试的样本量（Simonsohn, 2015），预计招募有效被试 48 名。

效应量

根据 Perugini 等人提出的 Safeguard Power method, 选择原研究中报告效应量, 置信区间的下限作为重复研究的效应量。原研究中报告了第一个版本 GTDT 任务的分析方法, 分别对 LHB/CPP 和 SSVEP/SSVEP 累积量做独立回归, 使用决定系数 r^2 作为效应量, 由于原研究并未报告 r^2 的置信区间, 因此需要与原作者沟通后确定。第一个版本 GTDT 任务也分别对 SSVEP/LHB/CPP 和 RT 做回归分析, 原研究也未报告 r 的置信区间, 需要与原作者沟通。并根据效应量规划的结果, 再对样本量规划进行调整。

实验设计 (根据 pilot study 修改)

实验条件 1: 原版 GTDT 任务。

在这个条件下, 一个 block 包括 25 个试次, 每个试次持续时间 2.4s, 在每个试次开始时屏幕中央呈现一个深灰浅灰色相间的同心圆环, 圆环按照 21.25Hz 的频率闪烁 (根据具体实验时 CRT 显示器的屏幕刷新率调整), 在 1.6s 的时间内, 圆环的对比度从 65% 线性下降到 35%, 并在随后的 0.8s 线性回升到 65%。被试检测圆环对比度的变化, 一旦察觉到圆环对比度降低就右手按键做出反应。被试做出反应后, 圆环对比度的变化不会停止。两个试次之间的间隔时间随机为 4s/7.2s/10.4s, 一个 block 总时长 4 分钟。这个条件的 GTDT 任务总共包括 8 个 block。

实验条件 2: 心算版 GTDT 任务。

在这个实验条件下, 一个 block 包括 23-27 个试次, 每个试次持续时间 2.4s, 在每个试次开始时屏幕中央呈现一个深灰浅灰色相间的同心圆环, 圆环按照 21.25Hz 的频率闪烁 (根据具体实验时 CRT 显示器的屏幕刷新率调整), 在 1.6s 的时间内, 圆环的对比度从 65% 线性下降到 35%, 并在随后的 0.8s 线性回升到 65%。被试检测圆环对比度的变化, 心算计数一个 block 内圆环对比度下降的次数, 在 block 结束时口头报告次数。两个试次之间的间隔时间随机为 4s/7.2s/10.4s, 一个 block 总时长 4 分钟。这个条件的 GTDT 任务总共包括 5 个 block。

实验条件 3: 注意力转移版 GTDT 任务。

在这个条件下, 一个 block 包括 25 个试次, 每个试次持续时间 2.4s, 在每个试次开始时屏幕中央呈现一个深灰浅灰色相间的同心圆环, 圆环按照 21.25Hz 的频率闪烁 (根据具体实验时 CRT 显示器的屏幕刷新率调整), 在 1.6s 的时间内, 圆环的对比度从 65% 线性下降到 35%, 并在随后的 0.8s 线性回升到 65%。被试不再检测圆环对比度的变化, 而是检测圆环对比度下降的 1.6s 过程中, 呈现圆环的背景正方形图案尺寸的随机短暂变大, 正方形图案尺寸变大持续时间 100ms, 被试在检测到背景正方形尺寸变大时立刻右手按键盘空格键做出反应。这个条件的 GTDT 任务包括 3 个 block。

每个被试完成三种实验条件的 GTDT 任务。所有被试先完成实验条件 3 的 3 个 block。

EEG 记录&预处理 (根据 pilot study 修改)

使用 SynAmps 系统的 64 电极记录 EEG 波幅, 离线采样率 512Hz。

EEG 数据分段: 从目标开始前的 750 毫秒到峰值感官证据后的 400 毫秒。试次剔除标准: 如果当时任何时候双侧垂直眼电信号超过 $\pm 200\mu V$, 或者任何电极超过 $100\mu V$ 。SSVEP (21.25 或 20 Hz, 取决于任务版本)、和 LHB (22-30 Hz, 避免 SSVEP 频率) 使用标准的短时间傅里叶变换测量, boxcar window size 正好适合 SSVEP 频率的八个周期和 50ms size step。

SSVEP: 10-20 系统中 Oz 电极为中心的 7 个电极平均值。(根据 Pilot study 设备调整)

LHB: 10-20 系统左半球 C3 电极周围的 3 个电极平均值。(根据 Pilot study 设备调整)

CPP: 刺激出现前 500ms 基线矫正, 10-20 系统 CPz 电极周围 3 个电极平均值。