

# 恒河猴初级运动皮层 M1 运动解码脑机接口实验

洪波 [hongbo@tsinghua.edu.cn](mailto:hongbo@tsinghua.edu.cn)

基于运动解码的脑机接口旨在帮助丧失运动机能的残疾人。它的实现离不开对于运动的神经编码机制的探索。本次作业请大家分析恒河猴运动皮层神经细胞的放电，让大家了解探索感觉运动皮层的神经编码机制，以及运动解码脑机接口的基本原理。

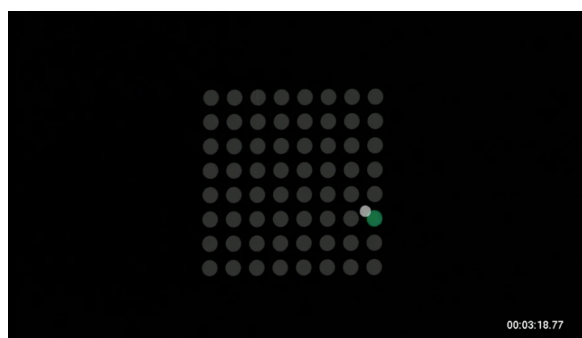


图 1 恒河猴用手控制白色光标追逐绿色目标点

（参见数据目录中的视频）

本次作业使用的数据集来自于开源数据集：[Nonhuman Primate Reaching with Multichannel Sensorimotor Cortex Electrophysiology](https://cloud.tsinghua.edu.cn/d/0bdb74d4316a4ded83dc/)。任务是两只恒河猴（indy 和 loco）控制自己的手在屏幕上移动光点追逐目标。实验者通过植入犹他电极阵列（Utah array）记录猴子初级运动皮层 M1 和初级体感皮层 S1 的 100-200 个神经细胞放电活动。数据格式及各变量含义请参考网页链接。我们提供了几份典型数据的下载链接，文件名中的“indy”和“loco”为猴子的名字，数字为实验的日期和批次：

<https://cloud.tsinghua.edu.cn/d/0bdb74d4316a4ded83dc/>

使用 MATLAB 的同学正常打开文件即可。对使用 Python 的同学，本题的 .mat 文件不能直接用 `scipy.io.load_mat` 函数打开，需要使用 h5py 库加载数据：

<http://docs.h5py.org/en/stable/quick.html>

或在 MATLAB 中将数据正常导入，再将导入的变量重新保存成新的能被 `scipy.io.load_mat` 打开的 .mat 文件。

数据中，`ch_names` 表示各个电极的标识名（格式为“M1 012”或“S1 087”，表示这个电极来源的脑区是 M1 还是 S1，以及电极的编号），`finger_pos` 表示受试猴子的手指实时位置，`t` 表示 `finger_pos` 的采样时间戳，`spikes` 为每个电极

记录到的神经元放电的时间序列（每个电极可能对应了不止一个神经元，这里的数据已经对不同神经元产生的放电预先做好了归类，即 spike sorting）。其余数据项与本次实验关系不大。原始的数据详细说明和更多的数据下载参见：

<https://zenodo.org/record/583331>

## 基本任务

本实验的主要目的是通过建立回归模型，用猴子的神经放电数据预测其手指运动的轨迹和参数。猴子的 M1 运动编码一般认为是发放率编码（rate coding），试以 64ms 作为时间窗的宽度（可以自行探索其他更合适的时间窗宽度），计算数据中猴子在各个时间点上不同神经元的发放率，舍弃那些平均发放率小于 0.5Hz 的神经元。同时，请在相同的时间窗尺度上，根据猴子手指的位置计算出其每个时间窗的 x、y 方向的**位移** Position、**速度** Velocity、**加速度** Acceleration 数据。

1. 根据已有研究发现，初级运动皮层 M1 运动编码采取群体编码（population coding）的方式，多个神经元通过调谐曲线协同编码手部运动的各种参数。更详细的解释可参阅参考文献 1 Georgopoulos 1986。

请选取一组或几组数据，试着采用**线性回归**方法（或者你认为合理的方法），通过猴子 M1（或 M1+S1）的神经元发放率，设计原理上合理、性能上尽量优秀的模型，解码猴子手部运动的位移、速度和加速度。

训练、调优和评估模型时，请按照规范先将数据切分为训练集、验证集（如有必要）和测试集。对于本题采用的连续时间数据，训练集和测试集不能按照采样点随机划分，而应按时间切块划分，以避免数据泄露和确保模型能有效泛化。

模型性能的评价指标请使用**测试集上的  $R^2$  值**（计算方法可以参考 <https://ww2.mathworks.cn/help/stats/coefficient-of-determination-r-squared.html>）和**信噪比**（ $SNR := -10 \log_{10}(1 - R^2)$ ）。仿照图 2 画出你的结果，并讨论这三个参数解码效果的差异，解释可能的原因。

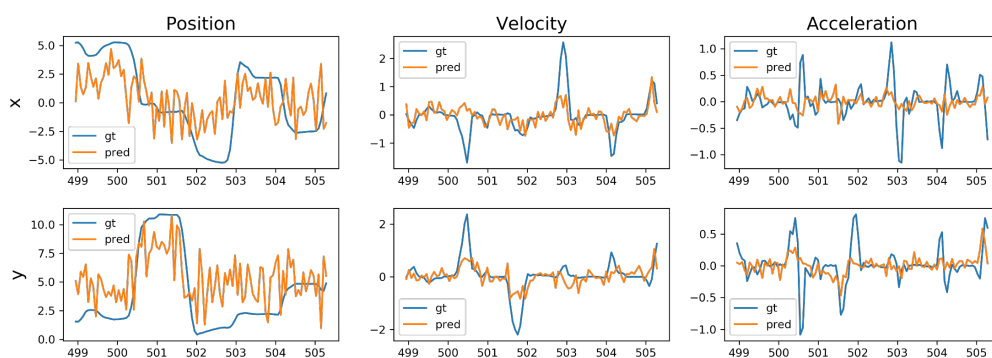


图 2 利用线性回归解码手部运动参数结果示意（仅供格式参考，并非理想结果）

(gt - Ground truth; pred- decoding model prediction)

2. M1 神经元对运动的编码，已知对于速度的方向存在  $\cos$  调谐规律(参考文献 4 Kennedy 2019)。试通过一些简单的方法挑选出对编码速度 Velocity 贡献较大的神经元。画出其中 10 个典型的 M1 神经元对于不同速度方向响应的“直方图”和调谐曲线（一般可以用余弦函数  $y = A \cos(x + \theta) + b$  近似，其中  $A$ 、 $\theta$ 、 $b$  是待定参数），得到各个神经元的偏好角度 (Preferred Direction)，参照图 3 画出你的结果；在单位圆上画出你按照一个合理的标准挑选出的对速度编码贡献较大神经元的偏好角度，参照图 4 画出你的结果。对你得到的结果简单阐述你的见解。

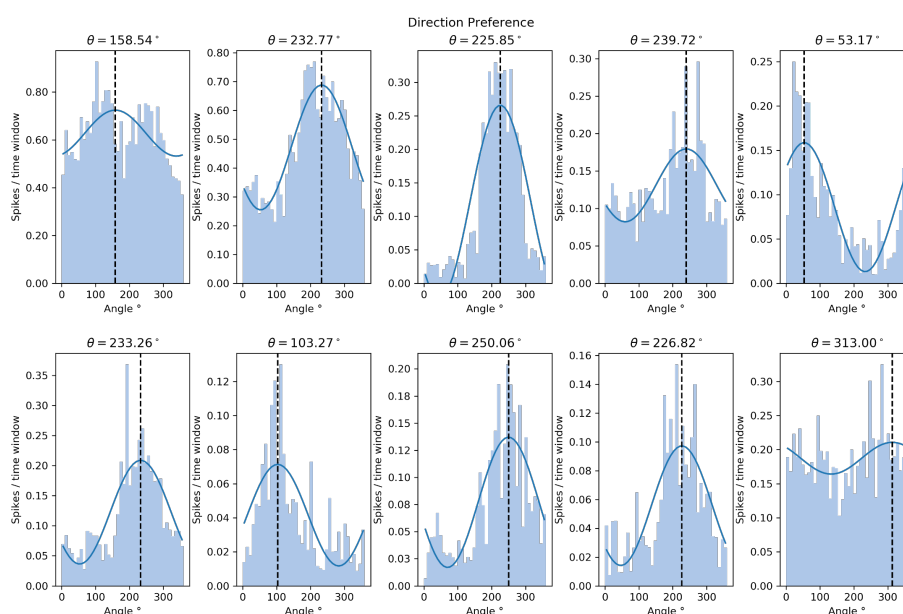


图 3 10 个神经元对偏好方向的 cosine 调谐曲线

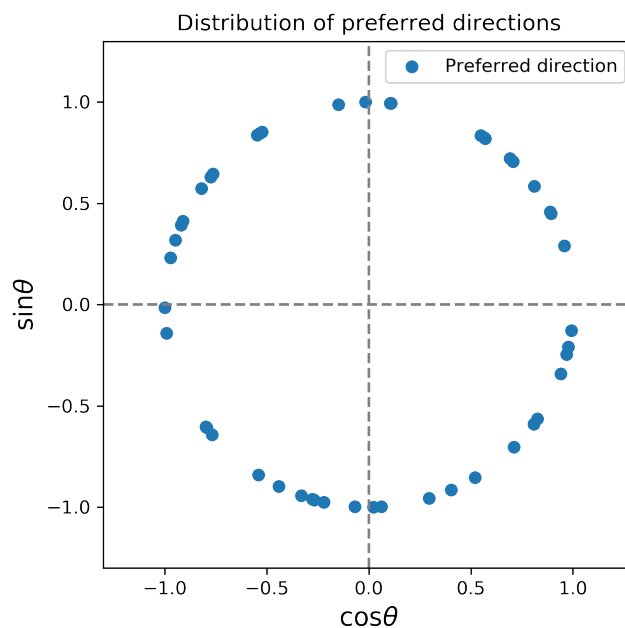


图 4 贡献较大神经元偏好方向的分布 (N=47, 不代表真实结果, 仅供参考)

- 分析间隔为三个月的两组数据中对于 M1 神经元调谐功能的变化以及产生的原因, 仿照下图画出你的结果。尝试解释这种变化背后的规律 (如果你认为有)。

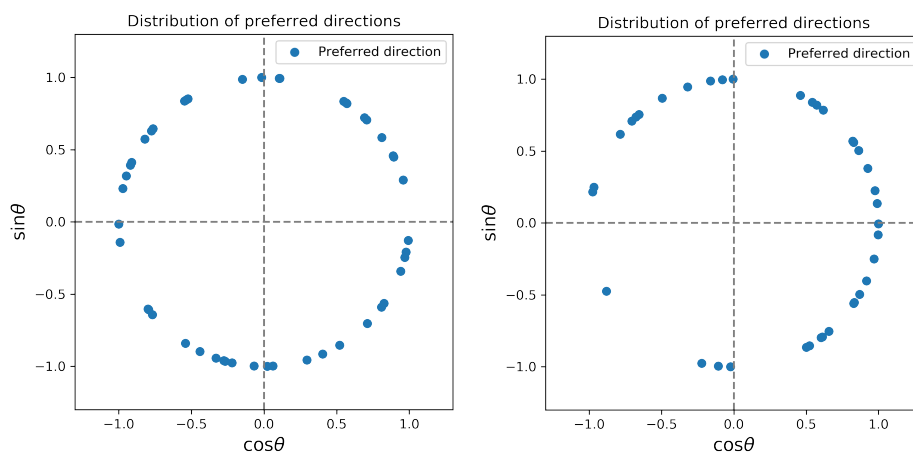


图 5 相隔 3 个月的神经数据分析得到的 M1 神经元偏好方向分布 (仅供参考)

## 探索任务（选做加分）

4. 在真实自然的运动控制中，时刻  $t$  的运动参数会在前一时刻  $t-1$  的运动参数基础上连续变化。前人研究发现，如果考虑运动参数的连续性，把卡尔曼滤波引入运动神经解码中，可以极大提高运动神经解码的准确率(参考文献 3 Wu 2003)。

最简单的卡尔曼滤波模型的原理和实现可参考如下链接：

MATLAB: <https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/Kalman/kalman.html>

Python: <https://pykalman.github.io/>

请在与第 1 问进行相同的数据提取和预处理的基础上，实现有监督的卡尔曼滤波训练，测试其解码效果，仿照图 5 画出你的结果，并与第 1 问的结果进行比较。

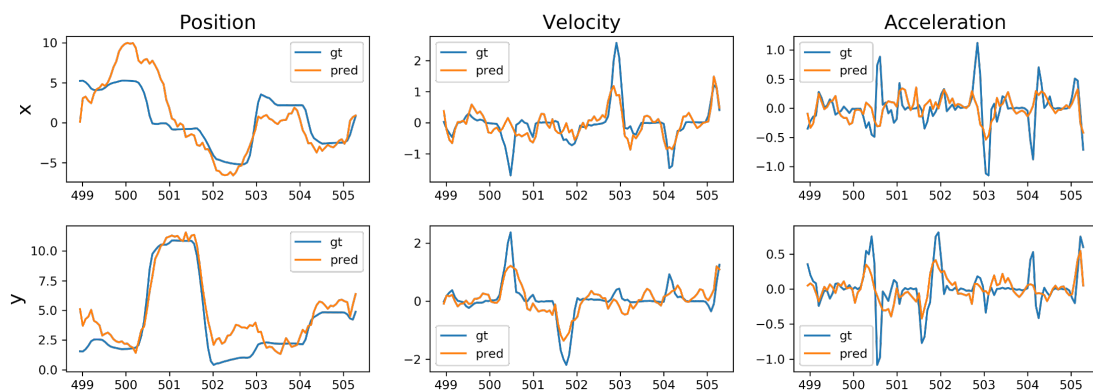


图 5 利用卡尔曼滤波解码手部运动效果示意（仅供格式参考，并非理想结果）

(gt - Ground truth; pred- decoding model prediction)

5. 数据中可以明显发现猴子运动经常有较长时间的停止。试探究 M1 神经元除了编码运动外，是否存在编码停止的神经元 (Stopping neuron/Still Neuron)，猜想它们的编码机制是怎样的？用数据分析支持你的猜想。
6. 数据集中除了只有 M1 区域电极记录的猴子 Indy，还有既记录了 M1 又记录了 S1 的猴子 Loco。请使用 Loco 猴子的数据，比较 M1 和 S1 区域的神经元对运动编码的贡献大小，以及它们对速度方向的调谐特性的异同。尝试针对你观察到的这些现象提出你对 M1 和 S1 区域的生理功能的见解。

## 参考文献

1. Georgopoulos AP, Schwartz AB, Kettner RE. Neuronal population coding of movement direction. *Science*. 1986 Sep 26;233(4771):1416-9. doi: 10.1126/science.3749885. PMID: 3749885.
2. O'Doherty, J. E., Cardoso, M. M., Makin, J. G. & Sabes, P. N. Nonhuman Primate Reaching with Multichannel Sensorimotor Cortex Electrophysiology. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.583331>, (2017).
3. Wu, W. *et al.* Neural decoding of cursor motion using a Kalman filter. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* (2003).
4. Kennedy, S. D. & Schwartz, A. B. Distributed processing of movement signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116**, 26266–26273 (2019).
5. Moran, D. W. & Schwartz, A. B. Motor cortical representation of speed and direction during reaching. *J. Neurophysiol.* **82**, 2676–2692 (1999).