

Извлечение коллективных переменных из многомерной нейронной активности клеток места

Н. А. Поспелов¹, В. П. Сотсков², К. В. Анохин³, С. К. Нечаев⁴,
А. С. Горский⁵

Мы исследовали коллективную активность нейронов места поля CA1 гиппокампа мыши при свободном исследовании среды. С помощью методов нелинейного понижения размерности мы показали, что активность популяции из нескольких сотен клеток может быть сведена к двум коллективным переменным, которые определяют положение животного на исследуемой ей трекке. Наши результаты свидетельствуют в пользу гипотезы распределенного кодирования и могут быть использованы для анализа коллективной активности нейронов в других областях мозга.

Ключевые слова: нейроны места, понижение размерности, распределенное кодирование

Большой интерес для нейронауки представляет собой изучение активности нейронных ансамблей на популяционном уровне. Главной целью такого анализа является выделение «коллективных» переменных, из набора которых и складывается активность сети. Количество физически значимых коллективных переменных обычно невелико, поэтому для их выделения используется понижение размерности входных данных. Редукция размерности проводится с целью извлечения новых признаков, которые позволяют более емко описать данные и вложить их в наиболее полезное и информативное подпространство.

В последние годы появляется все больше работ, использующих концепцию т.н. «нейронных мод» ([1]). Активность многих нейронов может

¹ *Поспелов Никита Андреевич* — ИПИМ МГУ, инженер-исследователь, e-mail: nikpos@yandex.ru.

Pospelov Nikita Andreevich — IPIM MSU, Research Engineer.

² *Сотсков Владимир Павлович* — ИПИМ МГУ, лаборант-исследователь, e-mail: vsotskov@list.ru.

Sotskov Vladimir Pavlovich — IPIM MSU, research assistant.

³ *Анохин Константин Владимирович* — ИПИМ МГУ, директор, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

Anokhin Konstantin Vladimirovich — IPIM MSU, Director.

⁴ *Нечаев Сергей Константинович* — лаборатория Понселе, НМУ, директор, e-mail: sergey.nechaev@gmail.com.

Sergey Konstantinovich Nechaev — Poncelet Laboratory, НИМ, Director.

⁵ *Горский Александр Сергеевич* — ИППИ РАН, ведущий научный сотрудник, e-mail: shuragor@mail.ru.

Gorsky Alexander Sergeevich — IPPI RAS, Leading Researcher.

быть описана в терминах N -мерного нейронного «пространства состояний», где каждая координата (как правило) отвечает за активность отдельной клетки. В экспериментах было показано, что реальная активность популяции нейронов занимает лишь малую часть такого «пространства состояний» ([2], [3], [4]), образуя низкоразмерное многообразие, структура которого определяется функциями регистрируемого нейронного ансамбля.

В качестве объекта исследования были выбраны нейроны места поля CA1 гиппокампа мыши, которые отвечают за кодирование ее пространственного местоположения. В ходе эксперимента мышь свободно перемещалась по среде, ее координаты и поведение фиксировались с помощью видеотрекинга. Эксперимент проводился для сред двух типов:

- 1) Простой кольцевой трек;
- 2) Круглая арена с 3 запрещенными зонами

Целью данной работы было получить информацию о поведении исследуемого организма только из структуры активности нейронов места. Для этого использовались нелинейные методы понижения размерности данных, в частности, метод laplacian eigenmaps ([5]), diffusion maps, UMAP и другие.

Основным результатом понижения размерности стало то, что в новом пространстве первые две координаты получили смысл координат мыши в физической среде, которую она исследовала (с точностью до поворота на фиксированный угол). Важно отметить, что при этом алгоритм не получал на вход никакой информации о реальном положении мыши. Таким образом, совпадение первых двух координат нового пространства с настоящим положением животного объясняется сходством векторов нейронной активности, считываемой в разное время, но в одном и том же месте исследуемого трека.

Нами была построена мера схожести распределения точек в низкоразмерном пространстве с настоящим распределением точек траектории животного. Выяснилось, что по мере обучения мыши в новой для нее среде обитания улучшается соответствие низкоразмерного представления активности клеток места и реальной траектории.

Наши результаты не могут быть воспроизведены с помощью линейных методов понижения размерности, таких как метод главных компонент (РСА) и, таким образом, найденные нами коллективные переменные не могут являться линейной комбинацией активности подмножества рассматриваемых клеток. Это свидетельствует в пользу гипотезы популяционного кодирования: помимо функциональной специализации отдельных нейронов мы видим наличие распределенного кодирования

информации популяцией клеток места гиппокампа. Закодированная информация, таким образом, может быть извлечена с помощью нелинейного понижения размерности.

Данная работа важна для понимания принципов внутреннего кодирования информации в гиппокампе. Исследование пространства нейронных состояний важно для восстановления «внутренней репрезентации» мозгом внешних стимулов.

Список литературы

- [1] Gallego J. A., Perich M. G., Naufel S. N. et al., “Cortical population activity within a preserved neural manifold underlies multiple motor behaviors”, *Nat Commun*, 2018, №9, 4233.
- [2] Gallego J. A., Perich M. G., Miller L. E., Solla S. A., “Neural manifolds for the control of movement”, *Neuron*, 2017, №94, 978–984.
- [3] Sadtler P. T. et al., “Neural constraints on learning”, *Nature*, 2014, №512, 423–426.
- [4] Yu B. M. et al., “Gaussian-process factor analysis for low-dimensional single-trial analysis of neural population activity”, *Neurophysiology*, 2009, №102, 614–635.
- [5] Belkin M., Niyogi P., “Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation”, *Neural computation*, **15**:6 (2003), pp. 1373–139.

Extracting collective variables from multivariate neural activity of place cells

Pospelov N.A., Sotskov V.P., Anokhin K.V., Nechaev S.K., Gorsky A.S.

We investigated the collective activity of the CA1 place field neurons of the mouse hippocampus during free exploration task. Using methods of nonlinear dimensionality reduction, we showed that the activity of a population of several hundred cells can be reduced to two collective variables that determine the position of the animal on the explored environment. Our results support the distributed coding hypothesis and can be used to analyze the collective activity of neurons in other brain regions.

Keywords: place neurons, dimension reduction, distributed coding

References

- [1] Gallego J. A., Perich M. G., Naufel S. N. et al., “Cortical population activity within a preserved neural manifold underlies multiple motor behaviors”, *Nat Commun*, 2018, №9, 4233.

- [2] Gallego J. A., Perich M. G., Miller L. E., Solla S. A., “Neural manifolds for the control of movement”, *Neuron*, 2017, № 94, 978–984.
- [3] Sadtler P. T. et al., “Neural constraints on learning”, *Nature*, 2014, № 512, 423–426.
- [4] Yu B. M. et al., “Gaussian-process factor analysis for low-dimensional single-trial analysis of neural population activity”, *Neurophysiology*, 2009, № 102, 614–635.
- [5] Belkin M., Niyogi P., “Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation”, *Neural computation*, **15**:6 (2003), pp. 1373–139.