

6. Tekel' P., Vicienik K., Mišiková I., Maco M., Kričfalusi M., Kužmová J. Kneppo P. Investigation of multipole representation of the cardiac biomagnetic field with respect to the real torso geometry.— In: Proc. of 5th World Conference on Biomagnetism, Vancouver, Canada, 1984.
7. Kneppo P. and Titomir L. I. Integral characteristics of human cardiac electric generator from electric field measurements by means of automatic coordinator.— IEEE Trans. Bio-Med. Eng., 1979, v. BME-26, p. 21—28.
8. Peters M. J., Swenenhuis M. J. M. van Oosterom, Wevers-Henke J. J. The influence of inhomogenities on the cardiac magnetic field distribution.— II Nuovo Cimento, 1983, v. 2D, p. 324—339.
9. Titomir L. I., Kneppo P. Simultaneous analysis of the cardiac electric and magnetic fields using the scalar multipole expansion.— Bull. Mathem. Biology, 1985, v. 47, N 1, p. 123—143.
10. Zrubec V., Vicienik K., Vrabček P., Bartók K., Skrúcaný R. Direct measurement of brain magnetic field with superconducting quantum magnetometers and its clinical perspective. 16.— In: Internationales Symposium Tieftemperaturphysik und Kryoelektronik. Bad Blankenburg, DDR, 1984.

Поступило в редакцию 10 октября 1985 г.

УДК 61.007 : 61 : 681.142.4 : 612.822.3

И. Н. ПОПОВ, М. Ф. ПЫШНЫЙ, Г. А. ШАРАЕВ,
И. А. ШЕВЕЛЕВ
(Москва)

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КАРТИРОВАНИЕ РЕЦЕПТИВНЫХ ПОЛЕЙ ЗРИТЕЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ

До сих пор исследование рецептивного поля (РП) нейрона зрительной системы, т. е. совокупности фоторецепторов, посылающих к нему сигналы, проводится, как правило, вручную. Картирование РП заключается в том, что на проекционном экране в поле зрения животного появляются вспыхивающие или движущиеся изображения (световые пятна, решетки, полосы), а реакция нейрона на них соотносится с координатами экрана. Такие исследования весьма важны для понимания переработки зрительной информации в мозге человека и животных и для построения адаптивных систем искусственного зрения в робототехнике. Назрела необходимость детального количественного исследования РП зрительных нейронов путем картирования их движущимися и вспыхивающими изображениями, предъявляемыми ЭВМ в случайном порядке в разных частях поля зрения. В литературе есть отдельные указания на такие опыты, однако до сих пор они были крайне ограничены по задачам и возможностям и использовали неизменные по параметрам раздражители [1—3].

В настоящей работе описан разработанный нами аппаратно-программный комплекс для количественного исследования РП зрительных нейронов в ходе управляемого от ЭВМ эксперимента, позволивший проводить оптимизацию программ тестирования РП каждого нейрона в соответствии с его индивидуальными функциональными свойствами.

Установка для автоматизированного исследования РП зрительных нейронов. Установка включает следующие основные приборы и блоки (рис. 1): микроманипулятор 1 для подведения электрода к нейрону; микроэлектродный усилитель 3 с катодным повторителем 2; осциллоскоп для контроля регистрируемой активности 4; амплитудный дискриминатор-формирователь 5 с контрольным осциллоском 6;

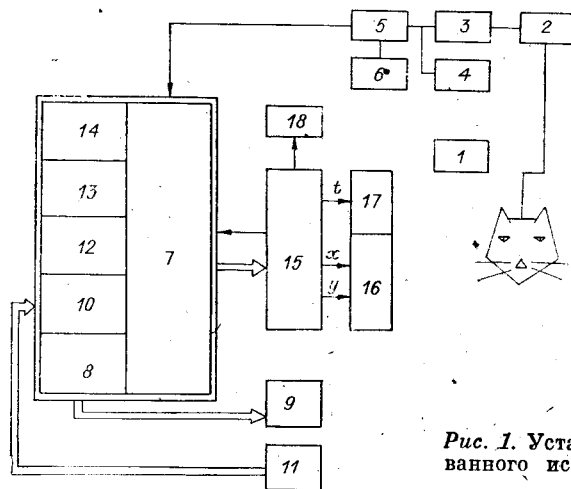


Рис. 1. Установка для автоматизированного исследования РП зрительных нейронов

мини- или микроЭВМ 7; фотостимулятор проекционного типа [4] с двухкоординатным электромеханическим отклонением светового луча зеркальными гальванометрами 16 и с электромеханическим затвором 17; программируемый контроллер для связи ЭВМ с фотостимулятором 15; графопостроитель 18.

В одну из двух созданных нами автоматизированных установок включена мини-ЭВМ «Мульти-4» из программируемого ядерного анализатора ИН-90 («Интертехник», Франция) с оперативной памятью 64 кбайт, основным дисплеем 8 и пультом управления 10 для программиста, дополнительным дисплеем 9 и пультом 11 для экспериментатора, цифропечатающим устройством 12, накопителями на гибких дисках 13 и магнитной ленте 14. Основой второй аналогичной по назначению установки стала микроЭВМ «Электроника 60М» и кейт КАМАК с набором модулей.

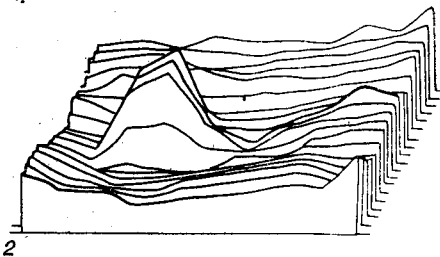
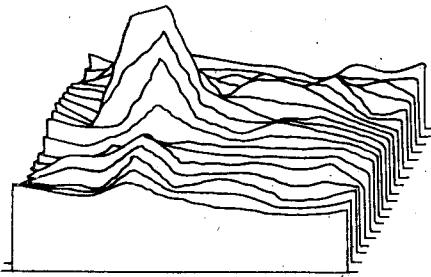
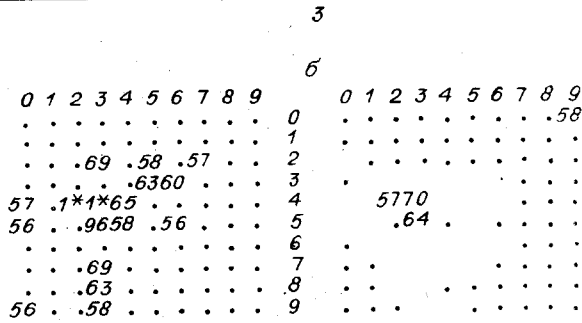
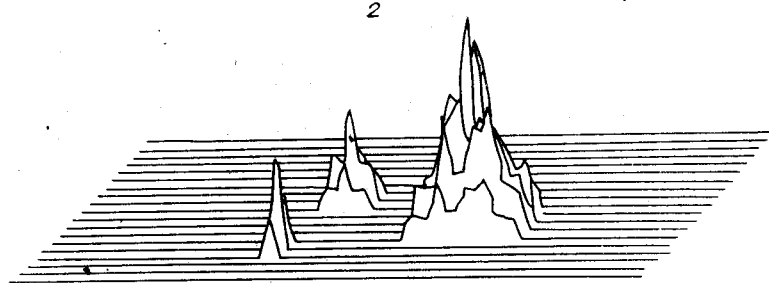
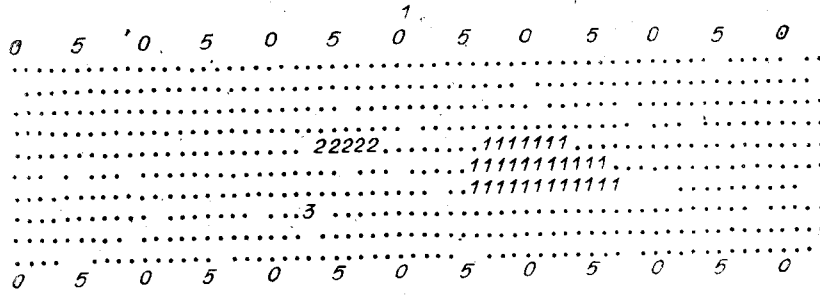
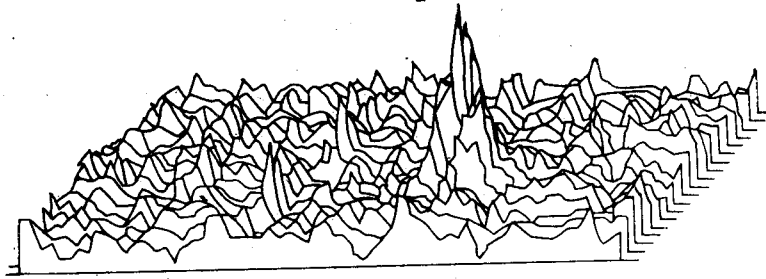
Блоки 5, 9, 11, 15, 16 и 17 разработаны и изготовлены авторами. Программируемый контроллер 15 обеспечивает несколько режимов управления фотостимулятором: различные виды сканирования движущимися световыми стимулами проекционного экрана и предъявление в произвольных его точках световых вспышек. Вид сканирования, количество его циклов, скорость движения стимула и угол поворота его к горизонтали, размеры стимулируемой области, а также координаты тестируемых вспышками точек программируются как от ЭВМ (через ее двухбайтовый канал цифрового вывода), так и от автономного пульта управления контроллера. Основу контроллера составляют два 10-разрядных цифроаналоговых преобразователя с двоичными реверсивными счетчиками, схемами управления, интерфейсом связи с ЭВМ и мультиплексором, переключающим контроллер на ручной или автоматический режим управления.

Программное обеспечение управляемого эксперимента. Создан пакет программ накопления данных, их обработки, записи на магнитный носитель и визуализации, а также управления фотостимулятором. Ряд программ осуществляет автоматический поиск РП его разрядного центра. При разработке этих алгоритмов мы стремились к тому, чтобы реализующие их программы имитировали аналогичную деятельность опытного экспериментатора, имеющего ту же информацию, которой располагает программа. Перечисленные программы включены в виде подпрограмм в большую диалоговую программу организации управляемого эксперимента. Диалог экспериментатора и программы происходит с помощью пульта управления и дисплея. В ходе эксперимента ЭВМ визуализует на дисплее текущие ответы нейрона, а затем после окончания накопления данных выводит на дисплей перистимульные гистограммы импульсации нейрона (ПСТГ), карты нейронной активности (рис. 2) и некоторые текстовые высказывания, требующие от экспериментатора альтернативного выбора. Наличие такого выбора на каждом этапе дает экспериментатору возможность вносить коррективы в ход программы, заново параметризовать ее или утверждать предлагаемые ЭВМ решения о дальнейшем ходе опыта. Результаты машинного поиска РП или его разрядного центра (возможно, скорректированные экспериментатором) модифицируют или по-иному параметризуют программу дальнейшей стимуляции, тем самым гибко и оптимально приспособляя ее к индивидуальным особенностям РП исследуемого нейрона.

При разработке программы на ЭВМ ИН-90 использовались языки программирования трех уровней: общая организационная и диалоговая программа написана на языке ЛЕМ-2 (аналог языка Бейсик), основные подпрограммы, ведающие обработкой данных и визуализацией, — на Фортране-IV, а операции, требующие наибольшего быстродействия (накопление данных, их пересылка), программировались на Ассемблере. На ЭВМ «Электроника 60М» программирование велось на языке Квейсик и Ассемблер.

Ход управляемого эксперимента. Отведение импульсов, генерируемых одиночными нейронами подкоркового зрительного центра — наружного колленчатого тела или зрительной коры мозга кошки, производилось внеклеточно стеклянными или вольфрамовыми микроэлектродами, погруженными в исследуемую структуру. Программа автоматизированного исследования РП каждого нейрона обычно содержит несколько этапов и начинается со сканирования стандартной световой полоской (горизонталь размером $4 \times 1^\circ$) всего экспериментального экрана ($50 \times 50^\circ$) по 10 прямолинейным траекториям (например, снизу вверх), выбираемым в случайном порядке. Каждая из таких 10 проходок стимула по экрану со скоростью около 4 град/с длится 12,8 с и сопровождается вводом в ЭВМ нейронной активности. При этом в памяти ЭВМ (зона накопления) каждая строка сканирования отображается 64 бинами по 200 мс. Существенно, что все эти параметры легко перепрограммируются.

Автоматический поиск РП и его визуализация на дисплее. По окончании этапа сканирования в памяти ЭВМ формируется матрица $R(i, j)$, $i = 1, \dots, 10$; $j = 1, \dots, 64$, отражающая число импульсов, попавших в j -й бин i -й строки. При равномерном прямолинейном сканировании по равноотстоящим траекториям элементы матрицы $R(i, j)$ жестко связаны с угловыми координатами стимула x и y в пространстве поля зрения. Это дает нам основания называть матрицу $R(i, j)$ картой РП в ответ на сканирующий стимул. Поиск РП осуществляется следующим образом: а) на элементах i, j матрицы R отыскивается абсолютный максимум i_1, j_1 ; б) проверяются элементы i, j , $1 \leq j \leq 64$, $j \neq j_1$, расположенные вдоль строки i_1 (при превышении ими некоторого порога они также считаются принадлежащими РП); в) тем же способом анализируются элементы смежных строк $i_1 - 1, i_1 + 1$, соседние с элементами, выделенными на шаге «б». Процедура заканчивается в случае, если на очередной проверяемой строке не найдется элементов, превышающих порог, либо по достиже-



нии краев матрицы. Выделенные в результате точки образуют связную область, окружающую найденный максимум i_1, j_1 .

Визуализация зарегистрированной карты $R(i, j)$ осуществляется путем вывода на дисплей таблицы (10×64 элемента) с указанием символами «1», «2» и «3» в порядке приоритета найденных «кандидатов» на звание РП (рис. 2, а). Выбор среди них производится экспериментатором, который, впрочем, может перейти к указанию координат дальнейшего тестирования и вручную.

Тестирование выявленного РП световыми вспышками. Программа «описывает» около найденного РП прямоугольник с вертикальными и горизонтальными сторонами и в пределах этого прямоугольника тестирует нейрон локальными световыми стимулами, вспыхивающими в случайном порядке в разных точках с частотой 0.5 Гц. Вспышки покрывают весь тестируемый прямоугольник, располагаясь в виде матрицы 10×10 (всего 100 вспышек). Эта процедура обычно производится однократно (она занимает около 3,3 мин), но может быть повторена требуемое число раз с суммацией данных. До и после тестирования происходит накопление фоновой активности нейрона.

Автоматический поиск разрядного центра и визуализация карт РП. Располагая сведениями о фоновой активности нейрона, программа с помощью простых статистических критериев [5] вычисляет порог возбуждения и выводит на дисплей две карты РП, построенные по ответам нейрона на включение и выключение световых вспышек (рис. 2, б). Первая из них отражает активность нейрона за интервал 0—200 мс от начала длящейся не более 200 мс вспышки, вторая — за интервал 200—400 мс. Для поиска разрядных центров РП по каждой карте сначала отыскиваются «наиболее связанные» области (содержащие наибольшее число соседних элементов, превышающих порог возбуждения), затем в пределах найденных областей — абсолютные максимумы, которые и считаются разрядными центрами РП. Для их наглядной визуализации соответствующие элементы карт на дисплее периодически гаснут и вспыхивают. Программа позволяет распечатать и серию карт РП, полученных из исходных данных методом временных срезов [6, 7].

Тестирование разрядного центра РП. Вспыхивающий стимул автоматически перемещается в найденный на предыдущем этапе разрядный центр РП. Здесь осуществляется накопление серии постстимульных гистограмм при различных условиях стимуляции: меняется интенсивность стимулов и их контраст с фоном, длительность экзозиции, размеры, форма и ориентация изображения, интервал между парными вспышками [7]. В каждом из этих случаев по серии накопленных ПСТГ машина строит функциональные графики, отражающие зависимость параметров (максимальная частота, число импульсов в пачке и во всем ответе, начальная и пиковая латентности, момент прекращения ответа) от параметров стимула. Кроме того, оценка функций проводится не только по суммарным показателям импульсации, но и по ее отдельным временным фрагментам — временным срезам [8, 9]. При этом по статистическим критериям, выработанным заранее во время «обучения» программы [5], в каждой гистограмме выделяются значимые ответы, достоверно отличные от фона и его флуктуаций.

Значение автоматизированного исследования рецептивных полей. Разработанные аппаратно-программные комплексы апробированы нами в ряде нейрофизиологических исследований. С их помощью получены данные о динамике зоны возбуждения и зоны торможения в РП нейронов НКТ и зрительной коры [6, 7], проведено сопоставление динамики зоны возбуждения и зоны суммации РП [10], обнаружены и исследованы динамические изменения ориентационной настройки корковых нейронов [8, 9]. Использование ЭВМ для сложной обработки нейрофизиологической информации и вырабатываемого на ее основе изменения тактики эксперимента дало ряд явно положительных результатов. Прежде всего резко увеличилась эффективность и качество автоматизированного нейрофизиологического исследования зрительных нейронов за счет ускорения и оптимизации программы исследования каждого из них по строго индивидуализированным и уточненным оценкам свойств. В какой-то мере такая индивидуализация возможна и без ЭВМ, однако в этом случае процедура значительно менее точна и требует много времени. За счет этого теряется часть информации о нейроне из-за ограниченности времени его регистрации. Не помогает в этом отношении обработка данных после опыта, так как время для индивидуализирующей коррекции программы тестирования нейрона уже упущено. Вторым существенным результатом использования ЭВМ для картирования РП — возможность проведения такой обработки и оценки свойств нейрона, которая вручную практически невозможна из-за громоздкости (например, временные срезы РП [6—9]). И, наконец,

Рис. 2. Пример карт рецептивного поля нейрона зрительной коры кошки на движущие стимула (а) (однократное накопление) и на вспышки локального светового пятна (б) по ответам на его включения (слева) и выключения (справа) (пятикратное накопление):

а: 1 — исходная карта в виде трехмерного рельефа; 2 — карта в форме, выводимой на экране дисплея; цифры 1—3 соответствуют трем выделенным программой областям возбудительных реакций; 3 — то же, что на 1, но с обнулением зоны отсутствия достоверных реакций; б: 1 — карты РП на экране дисплея; цифры 0—9, окаймляющие карты РП, — условные координаты; двузначные цифры — количество импульсов за 200 мс, превышающее порог возбуждения; торможение отображается пробелами; найденный программой разрядный центр располагается в точке с условными координатами 3, 4; 2 — те же карты в виде трехмерного рельефа

предложенная методика, с одной стороны, дисциплинирует экспериментатора-нейрофизиолога и биофизика, требуя от него четких ответов на вопросы программы, а с другой — облегчает его труд, освобождая от массы рутинных операций ради более творческих и ответственных решений во время опыта.

Наш опыт организации экспериментов показывает, что большинство исследователей быстро преодолевает психологический барьер и уже не мыслит исследований без ЭВМ. Нет сомнений, что развитие автоматизированного сенсорного тестирования — не просто желательное, а необходимое условие успешного продвижения в понимании нейронной организации опознавания сенсорных образов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heggelund P. Receptive field organization of simple cells in cat striate cortex.— *Exp. Brain Res.*, 1981, v. 42, p. 89.
2. Sasaki H., Bear D. M., Ervin F. R. Quantitative characterization of unit response in the visual system.— *Exp. Brain Res.*, 1971, v. 13, N 3, p. 239.
3. Spinelli D. N., Hirsch H. V. B., Phelps R. W., Metzler J. Visual experience as a determinant of the response characteristics of cortical receptive fields in cats.— *Exp. Brain Res.*, 1972, v. 15, N 3, p. 289.
4. Шевелев И. А., Марченко В. Г., Вальцев В. Б. Универсальный фотостимулятор для исследования зрительной системы человека и животных.— В кн.: Методическое и техническое обеспечение нейрофизиологического эксперимента. М.: Наука, 1976.
5. Шараев Г. А. Автоматическое выделение последовательных фаз физиологических реакций.— В кн.: Методика и техника экспериментальных исследований операторской деятельности. М.: Наука, 1982.
6. Шевелев И. А., Шараев Г. А., Волгушев М. А. и др. Динамика рецептивных полей нейронов зрительной коры и наружного колленчатого тела.— *Нейрофизиология*, 1982, т. 14, № 6, с. 622.
7. Шевелев И. А., Волгушев М. А., Шараев Г. А. Характеристики динамической перестройки рецептивных полей нейронов коры больших полушарий и наружного колленчатого тела кошки при изменении параметров световой стимуляции.— *Нейрофизиология*, 1983, т. 15, № 14, с. 347.
8. Шевелев И. А., Шараев Г. А. Сканирование диапазона ориентаций нейронами зрительной коры кошки.— *Нейрофизиология*, 1981, т. 13, № 5, с. 451.
9. Шевелев И. А., Шараев Г. А. Динамика ориентационной настройки нейронов зрительной коры кошки.— *Нейрофизиология*, 1981, т. 13, № 5, с. 451.
10. Волгушев М. А., Шевелев И. А., Дец К., Шараев Г. А., Вердеревская Н. Н. Различия в динамике зрительного рецептивного поля и его зоны суммации у кошек.— *Нейрофизиология*, 1983, т. 15, № 5, с. 466.

Поступило в редакцию 12 марта 1984 г.

УДК 612.014.421.8 : 621.398

Л. ГОМУТА, И. КРЕКУЛЕ, З. ТОМОРИ
(Братислава, Кошице, Прага, ЧССР)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МИКРОКОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Введение. При использовании микроЭВМ для обработки изображений, например, для вычисления геометрических параметров объектов [1], их числа, для автоматического слежения за подвижными объектами (животными в ходе опыта [2]) необходима предварительная обработка изобразительной информации (ИИ). В статье рассмотрены подходы к сжатию ИИ и приведены примеры, описывающие слежение за подвижными объектами при помощи микроЭВМ «Электроника 60» и вычисление площади объектов, гистограмм их оптической плотности при помощи персональной микроЭВМ типа ПМД-85 («Тесла», ЧССР), а также показаны возможности автономной видеопамяти, разработанной в Институте физиологии АН ЧССР.

Системы ввода ИИ в ЭВМ. Для ввода ИИ используются три типовых подхода, отличающихся быстродействием, сложностью реализации и уровнем сжатия ИИ: а) ввод кадра по столбцам; б) ввод кадра ИИ, сжатого на 1 бит/элемент в реальном времени; в) ввод ИИ, сжатой по строкам или кадрам.

Ввод ИИ по столбцам заключается в том, что из каждого кадра вводится один столбец элементов матрицы ИИ. Этим способом нельзя пользоваться для обработки нестационарной сцены из-за низкого быстродействия. Технически это решается при