

Применение диффузионной магнитно-резонансной томографии для определения нарушений нейропластичности головного мозга

Прокопьев В.А., СПбГУ, Санкт-Петербург vitaprok896@gmail.com,
Липкович М.М., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург lipkovich.mikhail@gmail.com

Аннотация

Разработка более точных и надежных методов для определения регионов коры головного мозга является ключевым шагом в углублении понимания организации мозга. Результаты применения таких методов анализа, как использование теории графов и выполнение диффузионно-тензорной визуализации, и машинного обучения позволяет достичь высокого качества классификации состояния пациентов.

Введение

Поверхность мозга состоит в основном из серого вещества (кортекс). Белое вещество, обеспечивающее взаимодействие частей мозга, в основном находится на глубинных слоях. На основе белого вещества строится карта связей, а сам процесс называется трактографией [1]. Кортекс можно разбить на регионы и получить атлас мозга [2], при этом мозг разбивается на парцели, а сам процесс разбиения называют парцелляцией. Если построить трактограмму и наложить атлас мозга, то можно выяснить, каким образом отделы мозга взаимодействуют между собой [3]. Примеры результатов выполнения процессов представлены на рисунке 1.

Традиционные методы парцелляции обладают ограничениями, существенно снижающими надёжность и интерпретируемость данных. На текущий момент существует несколько эффективных решений. В работе [4] описан следующий алгоритм, использующий диффузионно-тензорную визуализацию (ДТВ): применить методы трактографии к мозгу больного, далее, при помощи алгоритмов машинного обучения, определить, к каким регионам относятся начальные и конечные узлы белого вещества. Существует альтернативный подход, описанный в статье [5] и основанный на теории графов. На построенном при помощи матрицы смежности графе взаимодействия регионов через понятие центральности выделяются важные участки. На рисунках 2 и 3 показаны алгоритмы работ [4] и [5] соответственно.

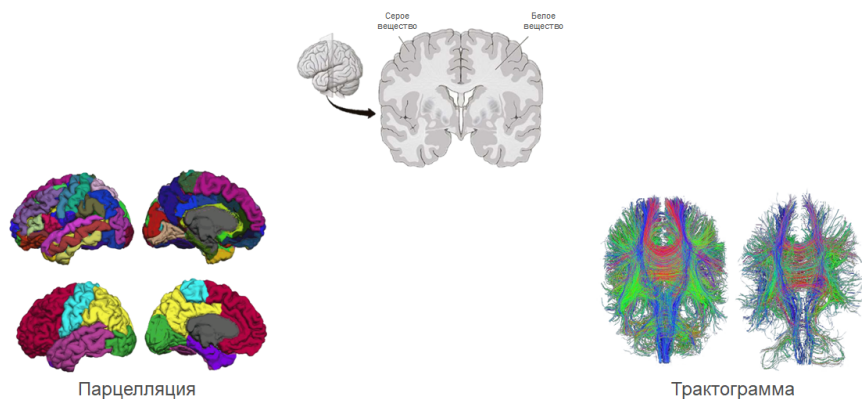


Рис. 1: Пример отображения вещества в головном мозге и выполнения на его основе парцелляции и трактографии

Предлагаемый доклад посвящён применению результатов диффузионной магнитно-резонансной томографии (МРТ) в методах трактографии для определения регионов коры, к которым относятся узлы трактов белого вещества, и классификации состояния пациентов на основе данных МРТ головного мозга. Исследование позволит проверить применимость существующих методов для разработки более точных и индивидуальных парцелляций, учитывающих как структурную, так и функциональную организацию мозга.

Используемые данные

Для проведения эксперимента был задействован набор данных [6], в котором представлены данные 25 пациентов: 16 здоровых пациентов и 9 пациентов с нарушениями нейропластичности. Были проведены две сессии оценки качества работы мозга: перед началом тренировки и после определённого периода обучения. На основании результатов обучения было принято решение о причислении к конкретной группе пациентов.

Набор данных хранит в себе файл с основными данными в виде 4D-массива, описывающего значения по координатам X, Y, Z в различные периоды мозговой активности; файл со значениями интенсивности градиента (bvals) для каждого направления диффузии; файл с направлениями диффузии (bvectors) для каждого измерения; файл с маской мозга, который определяет область интереса для анализа; файл с метаданными для маски мозга.

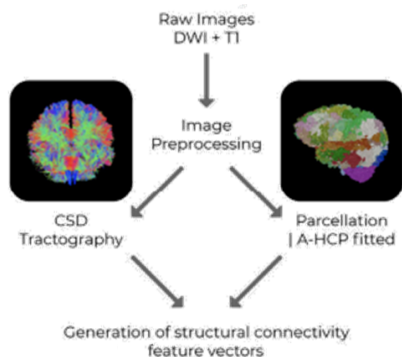


Рис. 2: Алгоритм на основе ДТВ

Реализуемые подходы

Анализ при помощи диффузионно-тензорной визуализации

При помощи *bvals* и *bvecs* описывается схема градиентов магнитного поля, которые применялись во время сканирования. Для построения трактографии мозга необходимо создать маску белого вещества, которая будет отображать взаимодействие областей интереса между собой. На основе полученной функции распределения ориентации можно выявить основные направления распространения воды и построить потоки перемещения воды. Для выявления точек, в которых будет проверяться наличие белого вещества и его направление, производится настройка алгоритма диффузионно-тензорной визуализации при помощи схемы градиентов. На основе маски и аффинного преобразования, полученного из данных МРТ, происходит отбор точек. После этого алгоритм выявляет потоки белого вещества.

Для выявления структурной взаимосвязи регионов используется анатомический атлас, предварительно адаптированный под данные. Происходит нанесение потоков белого вещества на применяемый анатомический атлас. Построив матрицу связности, легко визуализировать взаимодействие областей между собой.

Обучение классификации происходит на основе признаков матрицы связности.

Схематическое отображение процесса анализа проведения ДТВ представлено на рисунке 4.

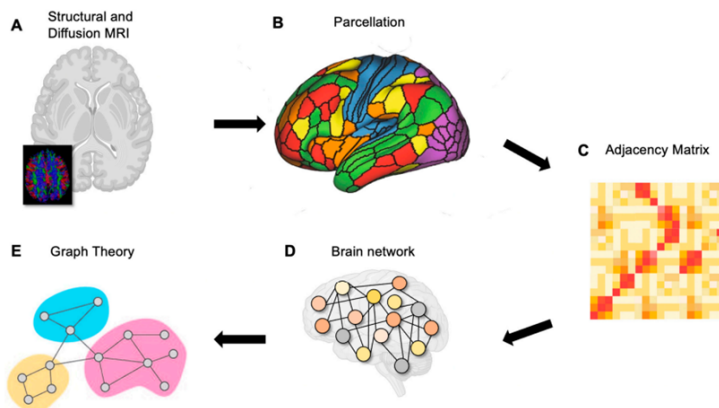


Рис. 3: Алгоритм на основе теории графов

Анализ при помощи теории графов

Для определения связности регионов воспользуемся понятием центральности по посредничеству, мерой, которая оценивает, насколько часто узел лежит на кратчайших путях между всеми парами других узлов в графе. Узел с высокой степенью центральности по посредничеству имеет важное значение для связности всей сети. В случае МРТ головного мозга регион будет активно включён в передвижение белого вещества.

На основе построенной матрицы связности определяется центральность регионов и их связанность между собой. Обучение классификации происходит на основе определяемых параметров теории графов.

Выполнение классификации

В качестве рассматриваемых методов классификации были выбраны такие алгоритмы, как случайный выбор, наивный Байес, случайный лес и метод опорных векторов.

Набор данных был разделён на обучающую и тестовую выборку в соотношении 7:3. Обучение классификации происходит на основе группы пациента.

Для улучшения качества был проведён подбор гиперпараметров модели методом кросс-валидации. Данные разбивались на фолды, содержащие в себе различные поднаборы исходного датасета.

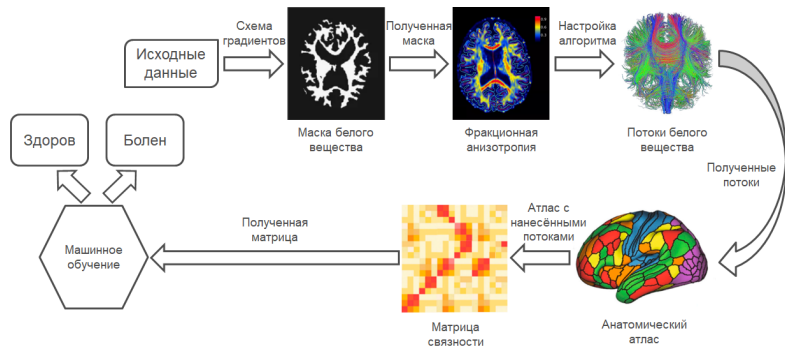


Рис. 4: Реализация подхода ДТВ

Также стоит отметить, что проводится подбор порогового значения вероятности для определения принадлежности к классу «Болен».

Результаты

Для оценивания работы моделей использовалась F1-мера. Высокая F1-мера означает, что модель чаще всего правильно указывает на больного, причём очень редко пропускает тех, кому нужна помощь. Математическое ожидание говорит об общей возможности модели решать поставленную задачу, а дисперсия – о стабильности работы.

Результаты обучения моделей представлены в таблице 1. M(F1) – математическое ожидание по F1, D(F1) – дисперсия по F1.

Название модели	Вид данных	M(F1)	D(F1)
Случайный выбор	-	0.7671	0.0162
Наивный Байес	Граф с нормировкой	0.7378	0.0249
Случайный лес	Граф без нормировки	0.8059	0.0206
Метод опорных векторов	Матрица с нормировкой	0.9008	0.0112

Таблица 1: Показатели моделей

Лучшим результатом стало значение метрики F1 в 0.90 для метода опорных векторов, обученного на признаках нормированной матрицы связности.

Масштабирование

Текущая реализация имеет огромный простор для улучшений. Приведём некоторые возможные улучшения:

1. Классификация

Текущая реализация рассматривает возможности системы выявить одну конкретную болезнь. Следует рассмотреть возможность выявлять несколько болезней.

2. Обработка данных

К исходным данным можно применить операцию регистрации, при которой данные из одного пространства измерений переносятся в другое пространство. Это может подстроить процесс анализа под необходимый вариант интерпретации. Также это может повлиять на качество работы алгоритмов определения группы пациентов.

3. Оптимизация ресурсов

Текущая реализация использует последовательное исследование данных пациентов. Возможно настроить параллельную обработку и тем самым ускорить процесс анализа данных.

Заключение

В докладе приведены основные подходы к анализу МРТ головного мозга. Рассмотренные методы показали свою эффективность в создании точных и надежных парцелляций, учитывающих функциональную значимость мозговых областей. Разработанная система демонстрирует возможность автоматизировать процесс определения регионов коры головного мозга, опираясь на данные о структуре белого вещества и связности между различными областями.

Список литературы

- [1] Omniscient Neurotechnology. — What is tractography?
<https://www.o8t.com/blog/tractography>.
- [2] Omniscient Neurotechnology. — What are brain maps?
<https://www.o8t.com/blog/brain-maps>.

- [3] Omniscient Neurotechnology. — What are brain networks?
<https://www.o8t.com/blog/brain-networks>.
- [4] Doyen, S. Connectivity-based parcellation of normal and anatomically distorted human cerebral cortex / S. Doyen, P. Nicholas, A. Poologaindran, L. Crawford, I. M. Young, R. Romero-Garcia, M. E. Sughrue // Omniscient Neurotechnology. — 2021. — С. 1–12.
- [5] Tanglay O. Graph Theory Measures and Their Application to Neurosurgical Eloquence / O. Tanglay, N. B. Dadario, E. H N Chong, S. J. Tang, I. M. Young, M.E Sughrue // Cancers (Basel). — 2023. — С. 1–16.
- [6] OpenNeuro. — SCA2 Diffusion Tensor Imaging.
<https://openneuro.org/datasets/ds001378/versions/00003>.