

Universidad de La Habana
Facultad de Matemática y Computación



Título de la tesis

Autor:

Marié del Valle Reyes

Tutores:

Dr. Mitchell Valdes-Sosa
Nombre del segundo tutor

Trabajo de Diploma
presentado en opción al título de
Licenciado en Ciencia de la Computación

Fecha

github.com/username/repo

Dedicación

Agradecimientos

Agradecimientos

Opinión del tutor

Opiniones de los tutores

Resumen

Resumen en español

Abstract

Resumen en inglés

Índice general

Introducción	1
1. Estado del Arte	5
2. Propuesta	9
3. Detalles de Implementación y Experimentos	10
Conclusiones	11
Recomendaciones	12

Índice de figuras

Ejemplos de código

Introducción

El cerebro humano se concibe como un sistema complejo que controla y regula la mayoría de las funciones del cuerpo y de la mente. Este órgano desempeña un papel esencial en la percepción y el procesamiento de la información, debido a que es el encargado de recibir, interpretar y responder a los estímulos del entorno, lo cual permite a los individuos interactuar de manera efectiva con su mundo. La percepción implica la interpretación y organización de los estímulos sensoriales para formar una representación consciente de la realidad. El cerebro procesa la información visual, auditiva, táctil y otras modalidades sensoriales, integrándola para construir una experiencia coherente y significativa del entorno circundante.

Los dos hemisferios cerebrales desempeñan papeles notablemente diferentes en la percepción visual a pesar de su estrecha interacción, evidenciándose una lateralización hemisférica. Esta asimetría funcional se ha documentado exhaustivamente para procesar aspectos globales y locales de estímulos visuales **flevaris_spatial_2016**, donde el hemisferio derecho muestra un sesgo global y el hemisferio izquierdo muestra una preferencia local. Estos sesgos para los niveles local/global se han establecido a través de métodos psicofísicos **brederoo_hemispheric_2017**; **brederoo_reproducibility_2019** y electrofisiológicos **flevaris_attending_2014**; **iglesias-fuster_asynchronous_2015**; **jiang_neural_2005**.

El sesgo global/local de los hemisferios derecho/izquierdo podría explicarse en términos de las frecuencias espaciales (SF) asociadas con diferentes niveles de un estímulo visual. Las frecuencias espaciales describen cómo varía la información visual en términos de patrones de luz y sombra en una escena. Estos patrones pueden involucrar detalles finos o cambios suaves en la luminosidad. En el contexto visual, las SF más bajas se asocian comúnmente con aspectos globales, mientras que las SF más altas se asocian con aspectos locales **flevaris_spatial_2016**. En apoyo a esta idea, varios estudios han revelado un sesgo hacia SF más bajas en el hemisferio derecho y SF más altas en el hemisferio izquierdo **flevaris_spatial_2016**. Esto implica que el hemisferio derecho puede ser más eficiente en procesar información visual relacionada con la configuración global de un estímulo, mientras que el hemisferio izquierdo podría destacarse en detalles locales más finos. Además, se han encontrado vínculos entre la selección atencional global/local y las frecuencias espaciales de los estímulos

flevaris_spatial_2016. Sin embargo, cualquier teoría basada en estas consideraciones debe tener en cuenta el hecho de que los mismos aspectos de un estímulo visual pueden ser globales en un contexto y locales en otro (por ejemplo, un árbol es global en relación con una hoja pero local en relación con un bosque). El papel de cualquier SF no es fijo sino que depende del contexto.

Una posible forma de evaluar y medir la lateralización hemisférica se presenta a través de la medición de los campos receptivos de la población (pRF) mediante resonancia magnética funcional (fMRI) **dumoulin_population_2008; kay_principles_2018**. Los pRF constituyen modelos cuantitativos que describen la respuesta combinada de las neuronas dentro de un vóxel de fMRI (vértice cortical). Estos modelos suelen estimar la posición y el tamaño de la sección del campo visual que afecta a un vóxel específico **wandell_computational_2015**. La medición de respuestas de frecuencia espacial (SF) en los pRF también se ha convertido en un enfoque relevante, especialmente en áreas visuales tempranas (área visual primaria, V2, V3), ofreciendo perspectivas adicionales sobre la sintonización de SF en relación con el tamaño del pRF. Investigaciones recientes **aghajari_population_2020; broderick_mapping_2022** han demostrado que la sintonización de la frecuencia espacial de un pRF tiende a disminuir a medida que aumenta su tamaño, lo que sugiere una posible relación entre la lateralización hemisférica y las características de procesamiento de la información visual en el cerebro. Estas observaciones brindan una valiosa perspectiva para comprender cómo la lateralización hemisférica puede estar vinculada a las propiedades de los campos receptivos de la población.

La investigación sobre las propiedades de los pRF en función del campo visual, se ha focalizado principalmente en las diferencias entre los cuadrantes superior e inferior en la corteza visual primaria (V1), donde no se han observado diferencias significativas entre los cuadrantes derecho e izquierdo. Un estudio encontró tamaños de pRF ligeramente más pequeños en el cuadrante izquierdo en comparación con los cuadrantes horizontales derechos de las áreas visuales V2 y V3 y, nuevamente, no hubo diferencias en V1 **silva_radial_2018**. Esta observación sugiere que la lateralidad de las propiedades de los pRF en áreas visuales intermedias y superiores no se ha estudiado exhaustivamente. La dificultad para identificar sitios homólogos entre hemisferios en estas regiones, donde los mapas retinotópicos son menos definidos, puede contribuir a la falta de investigación detallada en estas áreas.

Existen varias bases de datos públicas de pRF **benson_bayesian_2018; himmelberg_cross-d** que cubren amplias extensiones de la corteza cerebral, lo que hace posible la prueba de la lateralidad de las propiedades de pRF en áreas visuales de orden intermedio o superior. Para examinar las diferencias derecha/izquierda en el tamaño del pRF, se pueden utilizar dos estrategias denominadas aquí **anatómicas** y **homotópicas**. El objetivo es comparar sitios corticales homólogos, pero como se mencionó anteriormente, definir "homólogo" presenta dificultades, especialmente para áreas de orden

superior con respuesta visual.

La estrategia anatómica mide las diferencias en las propiedades de pRF en un espacio donde las superficies corticales son aproximadamente simétricas en los hemisferios izquierdo y derecho. Esta simetría significa que cuando se considera el orden de los vértices, aquellos con el mismo rango en ambos hemisferios son aproximadamente homólogos.

El enfoque homotópico compara las regiones corticales con la conectividad anatómica o funcional más fuerte entre los dos hemisferios, una conexión que indica que probablemente trabajen juntos. Por lo tanto, la lateralización de las propiedades de pRF se puede examinar con una parcelación basada en la conectividad de resonancia magnética funcional en estado de reposo o relacionada con la tarea que identifica pares de áreas corticales homotópicas.

El objetivo general de este estudio es determinar de manera sistemática si existen diferencias en las propiedades de los campos receptivos entre los hemisferios izquierdo y derecho en áreas visuales de orden intermedio y superior. Para alcanzar este propósito, se emplearán algoritmos computacionales especializados y pruebas estadísticas rigurosas. El análisis se llevará a cabo mediante la aplicación de estrategias previamente descritas a tres bases de datos pRF. La utilización de algoritmos computacionales permitirá la extracción y comparación de las propiedades de los campos receptivos en ambos hemisferios, mientras que la aplicación de pruebas estadísticas proporcionará una evaluación cuantitativa de la significancia de las posibles diferencias identificadas.

Para lograr el objetivo general del presente trabajo se trazan los siguientes objetivos específicos:

- Estudio del estado del arte sobre el preprocesamiento de las resonancias magnéticas funcionales.
- Estudiar el estado del arte sobre los modelos de campos receptivos poblacionales.
- Estudiar los elementos teóricos de la lateralidad hemisférica cerebral.
- Implementar y evaluar las estrategias concebidas para la examinación de las diferencias en ambos hemisferios cerebrales en el tamaño de los pRF.

En lo siguiente, esta tesis se divide en cuatro capítulos. En el Capítulo 2, titulado "Marco Teórico-Conceptual", se realiza un análisis detallado del estado actual de la ciencia y tecnología en las áreas relevantes de esta investigación. En el Capítulo 3, titulado "Concepción y Diseño de las Estrategias", se describe en detalle la metodología para abordar la investigación sobre la lateralidad hemisférica, incluyendo aspectos clave del enfoque analítico. Detalles técnicos de la implementación del sistema se presentan en el Capítulo 4, titulado "Implementación y Experimentación". En este capítulo, se explora cualitativamente la validez de la solución implementada,

aprovechando las herramientas disponibles. Se describen los métodos y técnicas utilizadas para evaluar la lateralidad hemisférica en áreas visuales de orden intermedio y superior, destacando los resultados y observaciones obtenidas durante la experimentación. En la parte del desenlace, se presenta el Capítulo 5, donde se exponen las conclusiones de la investigación. Se destacan los logros clave en relación con los objetivos planteados, proporcionando un resumen de los hallazgos más significativos. Además, se presentan recomendaciones que señalan futuras direcciones de investigación, brindando perspectivas para la continuidad del estudio sobre la lateralidad hemisférica y el procesamiento visual. Finalmente, la bibliografía utilizada para respaldar la base científica de la solución propuesta y los anexos complementarios se incluyen en secciones respectivas, facilitando la exploración de temas relacionados y proporcionando una base sólida para la validación y respaldo de la investigación realizada.

Capítulo 1

Estado del Arte

Mapas Retinotópicos

En **benson_retinotopic_2012** se desarrolló de un algoritmo automático y determinista para ajustar un modelo retinotópico al área anatómicamente definida V1 en ausencia del usuario.

En **benson_bayesian_2018** se desarrolla un nuevo enfoque de mapeo bayesiano que combina la observación, unas mediciones retinotópicas del sujeto a partir de pequeñas cantidades de tiempo de fMRI, con un previo, un atlas retinotópico. Este proceso dibuja automáticamente límites de área, corrige discontinuidades en los mapas medidos y predice datos de validación con mayor precisión que un atlas solo o conjuntos independiente de datos.

se aborda la organización del córtex visual humano, que está compuesto por múltiples mapas retinotópicos. La caracterización precisa de la disposición de estos mapas en la superficie cortical es fundamental para numerosas investigaciones en neurociencia visual. En lugar de depender únicamente del análisis voxel a voxel de datos de fMRI, que mapea solo una porción del campo visual y está limitado por ruido de medición y evaluación subjetiva de límites, se presenta un novedoso enfoque de mapeo bayesiano. Este método combina observaciones, es decir, mediciones retinotópicas de un sujeto a partir de pequeñas cantidades de tiempo de fMRI, con un conocimiento previo, es decir, un atlas retinotópico aprendido. Este proceso automatiza la delimitación de áreas, corrige discontinuidades en los mapas medidos y predice datos de validación de manera más precisa que un atlas solo o conjuntos de datos independientes solos. Esta innovadora metodología no solo mejora la precisión del mapeo retinotópico, sino que también posibilita el análisis automático de grandes conjuntos de datos de fMRI y cuantifica las diferencias en las propiedades del mapa en función de la salud, el desarrollo y las variaciones naturales entre individuos.

pRF

En **carvalho_micro-probing_2020**, se aborda la caracterización de las propiedades del campo receptivo (RF), un aspecto fundamental para comprender las bases neurales del comportamiento sensorial y cognitivo. Se presenta una técnica innovadora denominada micro-probing (MP), diseñada para una caracterización detallada y en gran medida libre de suposiciones de múltiples campos receptivos (pRFs) dentro de un voxel. A diferencia de enfoques actuales que requieren numerosas suposiciones a priori y no pueden revelar propiedades inesperadas, como RFs fragmentados o subpoblaciones, MP supera estas limitaciones al permitir la detección de formas y propiedades inesperadas de RF, mejorando el detalle espacial de análisis de datos. MP utiliza modelos Gaussianos de tamaño fijo para muestrear eficientemente todo el espacio visual, creando mapas de sondas detallados, y posteriormente, se derivan pRFs a partir de estos mapas. La efectividad de MP se demuestra mediante simulaciones y al cartografiar campos visuales de participantes saludables y de un grupo de pacientes con RFs anómalos debido a un trastorno congénito de la vía visual. Sin requerir estímulos específicos ni modelos adaptados, MP mapeó los pRFs bilaterales característicos de observadores con albinismo. Además, en observadores sanos, MP reveló que los voxels pueden capturar la actividad de múltiples subpoblaciones de RFs que muestrean regiones distintas del campo visual. En resumen, MP proporciona un marco versátil para visualizar, analizar y modelar, sin restricciones, los diversos RFs de subpoblaciones corticales en la salud y la enfermedad.

En **dumoulin_population_2008** se computa un modelo del pRF y estima el campo visual así como otras propiedades como el tamaño y la lateralidad del campo receptivo. Los mapas obtenidos del campo visual con este método son mejores que los resultados del método convencional. Se comparan los mapas obtenidos con el pRF con los mapas obtenidos con métodos convencionales utilizando un coeficiente de correlación.

En **zeidman_bayesian_2018**, se presenta un marco probabilístico (Bayesiano) y una caja de herramientas de software asociada para mapear campos receptivos poblacionales (pRFs) basados en datos de fMRI. Este enfoque genérico está diseñado para funcionar con estímulos de cualquier dimensión y se demuestra y valida en el contexto de mapeo retinotópico bidimensional (2D). El marco permite al experimentador especificar modelos generativos (de codificación) de series temporales de fMRI, en los cuales los estímulos experimentales ingresan a un modelo pRF de actividad neural, que a su vez impulsa un modelo no lineal de acoplamiento neurovascular y respuesta dependiente del nivel de oxígeno en sangre (BOLD). Los parámetros neuronales y hemodinámicos se estiman conjuntamente, voxel por voxel o en regiones de interés, utilizando un algoritmo de estimación bayesiana (Laplaciano variacional). Esto aporta varias contribuciones novedosas al modelado de campos receptivos. Se

estiman la varianza/covarianza de los parámetros, lo que permite representar correctamente la incertidumbre sobre el tamaño y la ubicación del pRF. Se tiene en cuenta la variabilidad en la respuesta hemodinámica en todo el cerebro. Además, el marco introduce pruebas formales de hipótesis para el análisis de pRF, lo que permite evaluar modelos competitivos basados en su evidencia de modelo logarítmico (aproximado por la energía libre variacional), que representa el equilibrio óptimo entre precisión y complejidad. Mediante simulaciones y datos empíricos, se encontró que los parámetros comúnmente utilizados para representar el tamaño del pRF y la escala neuronal están fuertemente correlacionados, y este hecho se tiene en cuenta en los métodos Bayesianos descritos al realizar inferencias. Se utilizó el marco para comparar la evidencia de seis variantes de modelos pRF utilizando datos de fMRI funcional a 7 T, y se encontró que un modelo circular de Diferencia de Gaussianas (DoG) fue la mejor explicación para nuestros datos en general. Se espera que este marco resulte útil para mapear espacios de estímulos con cualquier número de dimensiones sobre la anatomía del cerebro.

La resonancia magnética funcional (fMRI) mide de manera no invasiva la actividad cerebral humana con una resolución de milímetros. Los científicos emplean diversas estrategias para aprovechar las extraordinarias oportunidades que ofrece la fMRI. En este contexto, se destaca el enfoque computacional de neuroimagen en la corteza visual humana, cuyo objetivo es construir modelos predictivos de las respuestas neuronales a partir de estímulos y tareas específicas. Se resalta la investigación activa en el uso de modelos de campo receptivo poblacional (pRF) para caracterizar las respuestas de la corteza visual humana a una variedad de estímulos, en distintas tareas y en diversas poblaciones de sujetos. Este enfoque ha mostrado avances significativos, permitiendo una comprensión más profunda de la organización funcional de la corteza visual mediante la predicción de respuestas neuronales a estímulos y tareas específicas. **wandell_computational_2015**

Modelos de frecuencia espacial

En **broderick_mapping_2022** se realiza un estudio que buscó caracterizar la sintonización de las neuronas en la corteza visual de primates, específicamente en el área V1, en relación con la frecuencia espacial. La frecuencia espacial se refiere al número de ciclos de un estímulo visual por unidad de ángulo visual, y es una propiedad importante de los estímulos visuales a la que las neuronas en el sistema visual son sensibles.

El estudio utilizó resonancia magnética funcional (fMRI) para medir las respuestas de las neuronas en la corteza visual primaria de los seres humanos. Los investigadores emplearon un conjunto novedoso de estímulos que consistían en rejillas sinusoidales dispuestas en coordenadas log-polares, que incluían geometrías circulares, radiales y

espirales. Este conjunto de estímulos les permitió investigar la sintonización de la frecuencia espacial en diferentes orientaciones y ubicaciones en el campo visual.

En el estudio **aghajari_population_2020**, se investigó la selectividad de las neuronas en la corteza visual temprana para estadísticas básicas de imágenes, centrándose en la frecuencia espacial. Utilizando una aproximación novedosa de análisis de fMRI basada en modelos, se buscó una estimación eficiente de la sintonización de la frecuencia espacial de la población (pSFT) para voxels individuales. Durante la adquisición de respuestas BOLD, los sujetos observaron estímulos generados por el filtrado de ruido blanco con cambios periódicos en la frecuencia central. Los resultados revelaron que, conforme aumenta la excentricidad en cada área visual, la frecuencia espacial máxima de la pSFT disminuye. Además, se encontró que la amplitud de la pSFT está correlacionada con la excentricidad y la frecuencia espacial máxima, mostrando que poblaciones con frecuencias máximas más bajas tienen amplitudes más amplias en escala logarítmica, y esta relación se invierte en escala lineal. Estos hallazgos contribuyen a una comprensión más profunda de cómo las neuronas en la corteza visual temprana responden a diferentes frecuencias espaciales, destacando la eficacia del enfoque basado en modelos en el análisis preciso y rápido de datos fMRI en este contexto.

Capítulo 2

Propuesta

Capítulo 3

Detalles de Implementación y Experimentos

Datos

Conclusiones

Conclusiones

Recomendaciones

Recomendaciones