

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	4
2. Marco Teórico	9
3. Detalles de Implementación y Experimentos	10
Conclusiones	11
Recomendaciones	12
Bibliografía	13

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.

En la percepción visual, los hemisferios cerebrales se especializan en funciones diferentes, a pesar de colaborar estrechamente en el procesamiento de la información. Se ha observado (Flevaris y Robertson 2016) que para procesar aspectos globales y locales de estímulos visuales, el hemisferio derecho muestra una inclinación hacia lo global y el hemisferio izquierdo muestra una preferencia local. No obstante, cualquier teoría que se derive de estas consideraciones debe tener en cuenta que distintos aspectos de un estímulo visual pueden ser percibidos como globales en un contexto y como locales en otro. Por ejemplo, la percepción de un árbol puede considerarse global en comparación con una sola hoja, pero local en relación con un bosque.

Una hipótesis dominante sobre cómo se diferencian los niveles globales y locales en el cerebro es en términos de sus frecuencias espaciales (SF) . En el contexto visual, las SF se refieren 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 son sensibles. Estudios realizados (Flevaris y Robertson 2016) muestran que las SF más bajas se asocian comúnmente con aspectos globales en el hemisferio derecho, mientras que las SF más altas se asocian con aspectos locales en el hemisferio izquierdo.

La medición de los campos receptivos de la población (pRF) mediante resonancia magnética funcional (fMRI) constituye una posible herramienta para evaluar y medir la lateralización hemisférica. Los pRFs constituyen modelos cuantitativos que predicen la actividad neuronal colectiva en un vóxel de fMRI en función de la selectividad de la respuesta a la posición del estímulo en el espacio visual. Estos modelos suelen estimar la posición y el tamaño de la sección del campo visual que afecta a un vóxel específico.

poner en
inglés

referenciar?

La lateralización hemisférica puede estar vinculada a las propiedades de los pRFs.

Por otra parte, se ha establecido que las neuronas en la corteza visual de los primates (específicamente en el área V1) muestran una sintonización con la frecuencia espacial, la cual depende de su ubicación en el campo visual. Existen modelos que determinan la frecuencia espacial preferida de los vóxeles o conjuntos de vóxeles de diferentes áreas visuales (Aghajari et al. 2020, Broderick et al. 2022). Considerando la sensibilidad de diferentes frecuencias espaciales de estímulos visuales en los hemisferios cerebrales, una metodología para medir la lateralidad hemisférica podría ser la comparación de la frecuencia espacial preferida de vóxeles homólogos en ambos hemisferios cerebrales.

El propósito del presente trabajo consiste en emplear modelos de pRF y modelos encargados de estimar la frecuencia preferida de los vóxeles, con el fin de evaluar la lateralización hemisférica en el cerebro humano. La hipótesis que guía nuestra investigación sostiene que los tamaños de los pRFs en el hemisferio derecho, en comparación con los tamaños de los pRFs análogos en el hemisferio izquierdo, deben ser mayores. Asimismo, se postula que las frecuencias preferidas de los vóxeles en el hemisferio derecho deberían ser menores que las de los vóxeles homólogos en el hemisferio izquierdo. Se estipula, además, que esta diferencia debería ser más pronunciada en áreas superiores del procesamiento visual.

En el marco de la presente investigación, se utilizará un enfoque basado en modelos estadísticos avanzados, específicamente un modelo lineal generalizado mixto. Este modelo permitirá abordar la complejidad inherente a la variabilidad interindividual, proporcionando así una evaluación robusta de las diferencias observadas.

Adicionalmente, se llevará a cabo la simulación de los resultados empleando un modelo de red neuronal artificial. Este enfoque se ha diseñado como una herramienta complementaria para la representación en el sistema visual de los resultados obtenidos. La utilización de una red neuronal artificial permitirá no solo corroborar los hallazgos observados con el modelo lineal generalizado mixto, sino también proporcionar una perspectiva más detallada de las complejas interrelaciones subyacentes en la organización hemisférica del procesamiento visual.

El objetivo general de este estudio es analizar la lateralización hemisférica en el procesamiento visual del cerebro humano, centrándose específicamente en la comparación de los tamaños de pRF y las SF preferidas de vóxeles homólogos en el hemisferio derecho e izquierdo, utilizando datos de fMRI.

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

- Aprender los elementos teóricos de la lateralidad hemisférica cerebral.
- Estudiar el estado del arte sobre los modelos de pRF y modelos de estimación de SF preferida de los vóxeles en áreas visuales.

- Implementar y evaluar las estrategias concebidas para el análisis de las diferencias en ambos hemisferios cerebrales, en el tamaño de los pRF y la preferencia de frecuencia espacial de vóxeles homólogos.

En lo siguiente, esta tesis se divide en cuatro capítulos. El primero refiere un estudio sobre trabajos relacionados al tema presentado. En el segundo, se ofrecerá una visión general de los conceptos teóricos asociados a mapas retinotópicos, modelos de pRF y modelos de estimación de frecuencia espacial preferida. En tercer capítulo, 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 cuarto capítulo, donde 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, destacando los resultados y observaciones obtenidas durante la experimentación.

Esto no
es seguro

Capítulo 1

Estado del Arte

Asimetría hemisférica en humanos en la percepción visual y relación con frecuencia espacial de los estímulos visuales

La asimetría hemisférica indica que cada hemisferio del cerebro tiene especializaciones únicas en el procesamiento de la información visual, contribuyendo de manera distinta a la comprensión y percepción del mundo visual. A lo largo de las décadas, diversas investigaciones han revelado que mientras el hemisferio izquierdo es más eficaz en el procesamiento de detalles finos y de alta frecuencia, el derecho sobresale en la percepción de patrones globales y de baja frecuencia.

En Flevaris y Robertson 2016 se profundiza en la asimetría hemisférica del cerebro y la relación entre la percepción global/local y el procesamiento de frecuencias espaciales (SF) en estímulos visuales. Se revisan investigaciones que sugieren que las frecuencias bajas (LSF) se asocian con la percepción global, procesadas predominantemente por el hemisferio derecho, mientras que las altas (HSF) se vinculan con la percepción local, manejadas por el hemisferio izquierdo.

El artículo expone que existen diversos estudios cognitivos, neuropsicológicos y neurofisiológicos donde se han encontrado diferencias hemisféricas funcionales en el procesamiento global/local, con el hemisferio derecho del cerebro demostrando un sesgo global y el hemisferio izquierdo demostrando un sesgo local. Por ejemplo, al presentar visualizaciones de letras de Navon (Navon 1977) en los campos visuales derecho e izquierdo los resultados revelan que los participantes identifican más rápido la letra global cuando se presenta en el campo visual izquierdo (proyectado al hemisferio derecho) y más rápido la letra local cuando se presenta en el campo visual derecho (proyectado al hemisferio izquierdo). Este sesgo también se ve respaldado por investigaciones con pacientes con lesiones cerebrales, donde se identificó que un grupo de pacientes con lesiones centradas en el hemisferio derecho experimentaban dificultades selectivas en la percepción de elementos globales en estímulos de letras de Navon, mientras que otro grupo de pacientes con lesiones centradas en el hemisferio izquier-

do manifestaba selectivamente problemas para percibir elementos locales. También se expone que estudios de fMRI y de electroencefalograma (EEG) respaldaron esta asimetría.

ver si
escribi
abre-
viatura
antes

Por otra parte, se explica que la relación entre las LSF y la percepción global, así como entre las HSF y la percepción local, se evidenció en experimentos donde los sujetos participaron en la detección de rejillas de SF en tareas global/local. Se observó que eran más eficientes en la detección de rejillas LSF después de prestar atención a una forma global, mientras que eran más hábiles en la detección de rejillas HSF después de focalizar su atención en las formas locales. Además, se han demostrado que la identificación de una rejilla sinusoidal con líneas "más gruesas" respalda un proceso del hemisferio derecho sesgado hacia los LSF, mientras que la identificación de líneas "más delgadas" respalda un proceso del hemisferio izquierdo sesgado hacia los HSF.

Mapas Retinotópicos

Un mapa retinotópico es la organización de la corteza visual en el cerebro que refleja la disposición espacial de la retina. Se cumple que puntos cercanos en la retina se corresponden con puntos cercanos en la corteza visual, lo cual implica que la disposición espacial de las imágenes en la retina se conserva en la representación cortical. Estos mapas son fundamentales para entender cómo el cerebro procesa la información visual y cómo se traducen las imágenes visuales en percepciones.

estoy
diciendo
lo mismo
dos veces

En Wandell y Jonathan Winawer 2011 se aborda el mapeo retinotópico en el cerebro humano utilizando fMRI. Se enfoca en los avances realizados en los últimos 25 años en la comprensión de los mapas de campos visuales en el cerebro humano, destacando el progreso significativo en las tecnologías de fMRI y en los métodos experimentales.

En Noah C. Benson, Butt et al. 2012 se examina la organización retinotópica de V1 .demostrando que la topología superficial del cerebro puede predecir con precisión la función retinotópica interna. Con estudios de fMRI, se hallaron en los participantes las medidas utilizadas para describir la localización de las respuestas neuronales en la corteza visual (ángulo polar y excentricidad), y se desarrolló un modelo algebraico para ajustar estos datos.

ver si lo
puse en
intro

En Noah C Benson y Jonathan Winawer 2018 se introduce un enfoque de análisis bayesiano para mapear mapas retinotópicos en el cerebro humano. Se presenta un modelo que combina datos retinotópicos (ángulo polar y excentricidad) y un atlas retinotópico preexistente a través de inferencia bayesiana, mejorando así la precisión y completitud de los mapas retinotópicos.

definición
atlas?

Modelos de Campo Receptivo de Población

El campo receptivo de población (pRF) es un concepto en neurociencia que describe un modelo que representa cómo un grupo de neuronas en una región específica del cerebro responde colectivamente a un estímulo visual. Este modelo permite entender mejor la actividad y la organización de la corteza visual, mostrando cómo diferentes áreas procesan información visual en conjunto, en lugar de enfocarse en las respuestas de neuronas individuales. Este modelo se ha utilizado para mapear la organización cortical, revelar los efectos de la atención en el procesamiento visual y mostrar diferencias en pacientes y poblaciones especiales.

En Dumoulin y Wandell 2008 se formula un modelo matemático del pRF utilizando una función Gaussiana que describe cómo la respuesta neuronal varía con la distancia desde el centro del campo receptivo. Incluye parámetros como la posición del centro del pRF, su tamaño, y la magnitud de la respuesta. La función Gaussiana se ajusta a los datos de actividad neuronal, obtenidos a través fMRI, para estimar las características del pRF en una población neuronal específica.

En Zuiderbaan et al. 2012 se introduce un modelo de pRF basado en la función Diferencia de Gaussianas (DoG), mejorando la capacidad de representar respuestas inhibitorias y la supresión periférica en la corteza visual.

En Kay, Jonathan Winawer et al. 2013 se desarrolla un modelo de pRF con una no linealidad estática compresiva, es decir, reduce la amplitud de las respuestas a medida que aumenta la intensidad del estímulo. Este modelo explica que la respuesta total a estímulos múltiples es menor que la suma de respuestas individuales.

En Amano et al. 2009 se analizan los mapas de campo visual y los tamaños de los pRF en el complejo MT+ humano, usando fMRI. Se halló que el tamaño de los pRF aumenta progresivamente desde V1/2/3 hasta LO-1/2 y TO-1/2, siendo TO-2 el área con los pRF más grandes. También observaron que dentro de cada mapa, el tamaño de los pRF aumenta con la excentricidad.

poner
que es
MT

En J. Winawer et al. 2010 se examina la organización del mapa visual del área hV4 y la corteza occipital ventral a través de fMRI y técnicas de pRF.

En Schwarzkopf et al. 2014 se investigan los pRFs en personas con trastornos del espectro autista (TEA).

En Wandell y Jonathan Winawer 2015 se destaca la utilización de modelos pRFs para caracterizar las respuestas neurales a diferentes estímulos y tareas visuales y se enfoca en la aplicación de pRFs para entender la atención, la plasticidad y las diferencias en condiciones psiquiátricas y neurológicas.

En Kay, Weiner y Grill-Spector 2015 se realiza un estudio que muestra que la atención aumenta la ganancia, el tamaño y la excentricidad de los pRF en áreas de alto nivel, pero no en áreas visuales tempranas.

En Welbourne et al. 2018 se analiza cómo la corteza visual humana procesa la información cromática a través de mediciones de campos receptivos de población

(pRF) usando fMRI.

En Noah C. Benson, Jamison et al. 2018 del Human Connectome Project, los pRF se utilizan para analizar la organización retinotópica de la corteza visual y subcortical en 181 adultos sanos.

En de Himmelberg et al. 2021 se comparan las propiedades de los pRFs de dos conjuntos de datos diferentes: uno de la Universidad de Nueva York (NYU) y otro del Human Connectome Project (HCP) (Noah C. Benson, Jamison et al. 2018).

Análisis de modelos de representación en el sistema visual humano

Las representaciones en el sistema visual humano se refieren a cómo el cerebro interpreta y procesa la información visual que recibe desde la retina. Incluyen desde la percepción básica de formas, colores y movimientos, hasta la interpretación compleja de escenas, rostros y expresiones emocionales. Con el objetivo de entender mejor la visión humana, se han desarrollado modelos que combinan las neurociencias, la psicología y la inteligencia artificial.

En Henriksson et al. 2008 se midieron curvas de sintonización de frecuencia espacial en áreas como V1, V2, VP, V3, V4v, V3A, y V5+, utilizando fMRI. Se observó que la frecuencia espacial óptima disminuye con el aumento de la excentricidad visual y varía según la ubicación retinotópica. Estos hallazgos apoyan la idea de que diferentes áreas visuales procesan la información visual en distintas escalas espaciales.

En Aghajari et al. 2020 se aplica un modelo log-Gaussiano para estimar la sintonización de frecuencia espacial a nivel de cada vóxel cerebral, revelando cómo varía la sensibilidad a la frecuencia espacial en la corteza visual inferior. Se miden respuestas a estímulos visuales de diferentes frecuencias espaciales, a través de fMRI. Los resultados indican que la frecuencia espacial preferida disminuye con la excentricidad visual y varía en función de la ubicación retinotópica. Además, se observa que el ancho de banda de sintonización depende de la excentricidad y está correlacionado con el pico de frecuencia espacial preferida.

En Kay 2011, octubre se propone el desarrollo de modelos de campo receptivo en la corteza visual primaria utilizando fMRI. Critica los métodos convencionales como la *medición de curvas de sintonización* y la *clasificación de patrones multivariados*, y propone en su lugar la estimación del campo receptivo, método que permite medir respuestas a una amplia gama de estímulos y desarrollar modelos que describan cómo los estímulos se traducen en respuestas neuronales.

En Broderick et al. 2022 se desarrollaron modelos para analizar la sintonización de la frecuencia espacial en la corteza visual primaria humana. Se ajustaron curvas de sintonización log-normal a las respuestas de grupos de vóxeles en diferentes excentricidades, que permiten estimar la respuesta promedio BOLD en diferentes frecuencias espaciales. Los resultados muestran que la frecuencia espacial preferida

ver si
explico
que es

varía inversamente con la excentricidad y se ve influenciada por la orientación del estímulo. Constituye una ampliación a la investigación previa sobre la sintonización de la frecuencia espacial en el córtex visual humano, como la realizada por Aghajari et al. 2020.

Capítulo 2

Marco Teórico

Mapa Retinotópico Bayesiano

En el contexto del estudio de Benson et al. (2012), el "ángulo polar" y la "excentricidad" se refieren a medidas utilizadas para describir la localización de las respuestas neuronales en el córtex visual. El ángulo polar indica la posición angular de un estímulo visual en el campo visual, como su posición relativa de arriba a abajo o de izquierda a derecha. La excentricidad, por otro lado, se refiere a la distancia de un estímulo visual desde el punto de fijación central en el campo visual, es decir, qué tan lejos está del centro de la visión. Estas medidas son clave para entender cómo el córtex visual mapea la información visual del mundo externo. Explicar en que consiste

pRF

Explicar la modelación de los pRF

Periodo Preferido

Ver modelo de periodo preferido de BRoderick

Capítulo 3

Detalles de Implementación y Experimentos

Datos

Conclusiones

Conclusiones

Recomendaciones

Recomendaciones

Bibliografía

- Aghajari, S., Vinke, L. N., & Ling, S. (2020). Population spatial frequency tuning in human early visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 123(2), 773-785. <https://doi.org/10.1152/jn.00291.2019> (vid. págs. 2, 7, 8).
- Amano, K., Wandell, B. A., & Dumoulin, S. O. (2009). Visual Field Maps, Population Receptive Field Sizes, and Visual Field Coverage in the Human MT+ Complex. *Journal of Neurophysiology*, 102(5), 2704-2718. <https://doi.org/10.1152/jn.00102.2009> (vid. pág. 6).
- Benson, N. C. [Noah C.], Butt, O. H., Datta, R., Radoeva, P. D., Brainard, D. H., & Aguirre, G. K. (2012). The Retinotopic Organization of Striate Cortex Is Well Predicted by Surface Topology. *Current Biology*, 22(21), 2081-2085. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.09.014> (vid. pág. 5).
- Benson, N. C. [Noah C.], Jamison, K. W., Arcaro, M. J., Vu, A. T., Glasser, M. F., Coalson, T. S., Van Essen, D. C., Yacoub, E., Ugurbil, K., Winawer, J., & Kay, K. (2018). The Human Connectome Project 7 Tesla retinotopy dataset: Description and population receptive field analysis. *Journal of Vision*, 18(13), 23. <https://doi.org/10.1167/18.13.23> (vid. pág. 7).
- Benson, N. C. [Noah C.], & Winawer, J. [Jonathan]. (2018). Bayesian analysis of retinotopic maps. *eLife*, 7, e40224. <https://doi.org/10.7554/eLife.40224> (vid. pág. 5).
- Broderick, W. F., Simoncelli, E. P., & Winawer, J. (2022). Mapping spatial frequency preferences across human primary visual cortex. *Journal of Vision*, 22(4), 3. <https://doi.org/10.1167/jov.22.4.3> (vid. págs. 2, 7).
- Dumoulin, S. O., & Wandell, B. A. (2008). Population receptive field estimates in human visual cortex. *NeuroImage*, 39(2), 647-660. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.09.034> (vid. pág. 6).
- Flevaris, A. V., & Robertson, L. C. (2016). Spatial frequency selection and integration of global and local information in visual processing: A selective review and tribute to Shlomo Bentin. *Neuropsychologia*, 83, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.10.024> (vid. págs. 1, 4).

- Henriksson, L., Nurminen, L., Hyvarinen, A., & Vanni, S. (2008). Spatial frequency tuning in human retinotopic visual areas. *Journal of Vision*, 8(10), 5-5. <https://doi.org/10.1167/8.10.5> (vid. pág. 7).
- Himmelberg, M. M., Kurzawski, J. W., Benson, N. C., Pelli, D. G., Carrasco, M., & Winawer, J. (2021). Cross-dataset reproducibility of human retinotopic maps. *NeuroImage*, 244, 118609. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118609> (vid. pág. 7).
- Kay, K. N. (2011, octubre). Understanding Visual Representation by Developing Receptive-Field Models. En N. Kriegeskorte & G. Kreiman (Eds.), *Visual Population Codes* (pp. 133-162). The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/8404.003.0009> (vid. pág. 7).
- Kay, K. N., Weiner, K. S., & Grill-Spector, K. (2015). Attention Reduces Spatial Uncertainty in Human Ventral Temporal Cortex. *Current Biology*, 25(5), 595-600. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.12.050> (vid. pág. 6).
- Kay, K. N., Winawer, J. [Jonathan], Mezer, A., & Wandell, B. A. (2013). Compressive spatial summation in human visual cortex [Publisher: American Physiological Society]. *Journal of Neurophysiology*, 110(2), 481-494. <https://doi.org/10.1152/jn.00105.2013> (vid. pág. 6).
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9(3), 353-383. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(77\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(77)90012-3) (vid. pág. 4).
- Schwarzkopf, D. S., Anderson, E. J., De Haas, B., White, S. J., & Rees, G. (2014). Larger Extrastriate Population Receptive Fields in Autism Spectrum Disorders. *The Journal of Neuroscience*, 34(7), 2713-2724. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4416-13.2014> (vid. pág. 6).
- Wandell, B. A., & Winawer, J. [Jonathan]. (2011). Imaging retinotopic maps in the human brain. *Vision Research*, 51(7), 718-737. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.08.004> (vid. pág. 5).
- Wandell, B. A., & Winawer, J. [Jonathan]. (2015). Computational neuroimaging and population receptive fields. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(6), 349-357. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.03.009> (vid. pág. 6).
- Welbourne, L. E., Morland, A. B., & Wade, A. R. (2018). Population receptive field (pRF) measurements of chromatic responses in human visual cortex using fMRI. *NeuroImage*, 167, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.11.022> (vid. pág. 6).
- Winawer, J. [J.], Horiguchi, H., Sayres, R. A., Amano, K., & Wandell, B. A. (2010). Mapping hV4 and ventral occipital cortex: The venous eclipse. *Journal of Vision*, 10(5), 1-1. <https://doi.org/10.1167/10.5.1> (vid. pág. 6).

Zuiderbaan, W., Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2012). Modeling center-surround configurations in population receptive fields using fMRI. *Journal of Vision*, 12(3), 10-10. <https://doi.org/10.1167/12.3.10> (vid. pág. 6).