

# Índice general

<b>1. Motivación, hipótesis y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.1.1. Problemática actual de los atlas cerebrales . . . . .	4
1.2. Hipótesis y objetivos de la tesis . . . . .	5
1.2.1. Hipótesis . . . . .	5
1.2.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	7
<b>2. Neurocirugía</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción . . . . .	9
2.2. Antecedentes en cirugía estereotáctica . . . . .	13
2.3. Cirugía guiada por imagen . . . . .	14
2.3.1. Definición y características . . . . .	14
2.3.2. Antecedentes . . . . .	16
2.4. Radiocirugía estereotáctica. Estado actual y aplicaciones . . . . .	17
2.4.1. Definición y características . . . . .	17
2.4.2. Antecedentes . . . . .	19
2.5. Estimulación cerebral profunda en pacientes afectados de la enfermedad de Parkinson . . . . .	21
2.5.1. Problema de localización del punto objetivo . . . . .	25
2.5.2. Limitaciones del procedimiento actual . . . . .	27
2.6. Resumen . . . . .	27

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>3. Atlas cerebrales</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción . . . . .	29
3.2. Atlas cerebrales impresos . . . . .	31
3.3. Atlas cerebrales digitalizados . . . . .	33
3.4. Atlas cerebrales deformables . . . . .	38
3.5. Atlas cerebrales probabilísticos . . . . .	39
3.6. Resumen . . . . .	42
<b>4. Transformación de Talairach</b>	<b>45</b>
4.1. Introducción . . . . .	45
4.2. Limitaciones de la transformación de Talairach . . . . .	47
4.3. Estado del arte de la transformación de Talairach . . . . .	50
4.4. Software que realiza la transformación de Talairach . . . . .	51
4.5. Coste computacional de la transformación de Talairach . . . . .	52
4.6. Ejemplo de la transformación de Talairach . . . . .	52
4.7. Resumen . . . . .	59
<b>5. Reconstrucción tridimensional del atlas de Talairach-Tournoux</b>	<b>61</b>
5.1. Introducción . . . . .	61
5.2. Trabajos previos . . . . .	63
5.3. Algoritmo de reconstrucción del atlas . . . . .	64
5.3.1. Obtención de los cortes del atlas . . . . .	64
5.3.2. Algoritmo de interpolación de cortes . . . . .	65
5.4. Resumen . . . . .	68
<b>6. Segmentación del córtex y ventrículos cerebrales utilizando Modelos Activos de Apariencia</b>	<b>71</b>
6.1. Segmentación en imagen médica . . . . .	71
6.1.1. Técnicas de umbralización . . . . .	75
6.1.2. Detección de bordes . . . . .	76
6.1.3. Crecimiento de regiones . . . . .	79
6.1.4. Método Watershed . . . . .	79

6.1.5. Contornos activos . . . . .	81
6.1.6. Técnicas de Clustering . . . . .	82
6.1.7. Otras técnicas de segmentación . . . . .	82
6.2. Modelos Activos de Apariencia . . . . .	83
6.2.1. Descripción de la forma . . . . .	83
6.2.2. Modelos de textura . . . . .	91
6.2.3. Formulación combinada de los modelos . . . . .	92
6.3. Búsqueda de los AAMs . . . . .	93
6.3.1. Método del descenso del gradiente . . . . .	94
6.3.2. Inicialización automática de los AAMs . . . . .	96
6.4. Segmentación de imágenes médicas usando Modelos Activos de Apariencia . .	97
6.5. Segmentación del córtex y ventrículos usando AAMs . . . . .	100
6.5.1. Creación de los modelos . . . . .	100
6.5.2. Segmentación del volumen completo . . . . .	105
6.5.3. Evaluación de los resultados de la segmentación . . . . .	105
6.6. Resumen . . . . .	112
<b>7. Interpolación con funciones de base radial</b>	<b>113</b>
7.1. Origen del método de interpolación basado en las funciones de base radial . .	113
7.2. Desarrollo del método multicuadrático . . . . .	114
7.3. Funciones de base radial . . . . .	120
7.4. Funciones definidas positivas y completamente monótonas . . . . .	122
7.4.1. Funciones definidas positivas . . . . .	122
7.4.2. Teorema de Bochner y funciones (estrictamente) definidas positivas . .	124
7.4.3. Funciones de base radial definidas positivas . . . . .	124
7.4.4. Funciones completamente monótonas . . . . .	126
7.5. Interpolación con precisión polinómica y funciones condicionalmente definidas positivas . . . . .	127
7.5.1. Interpolación con precisión polinómica . . . . .	127
7.5.2. Funciones condicionalmente definidas positivas . . . . .	129
7.5.3. Funciones radiales condicionalmente definidas positivas . . . . .	130
7.6. Funciones de base radial con soporte compacto . . . . .	131

## ÍNDICE GENERAL

---

7.6.1. Operadores utilizados en las funciones radiales . . . . .	132
7.6.2. Funciones de Wendland . . . . .	133
7.6.3. Funciones de Wu . . . . .	134
7.7. Resumen . . . . .	136
<b>8. Registro del atlas de Talairach-Tournoux usando funciones de base radial con soporte compacto</b>	<b>137</b>
8.1. Introducción . . . . .	137
8.2. Tipos de registro de imágenes . . . . .	140
8.2.1. Sujeto . . . . .	141
8.2.2. Interacción . . . . .	141
8.2.3. Modalidad de las imágenes . . . . .	142
8.2.4. Naturaleza de la transformación . . . . .	142
8.2.5. Localidad . . . . .	142
8.2.6. Dimensión . . . . .	144
8.3. Aplicaciones . . . . .	144
8.4. Métodos de registro . . . . .	146
8.4.1. Registro mediante modelos biomecánicos . . . . .	147
8.4.2. Modelo de registro elástico . . . . .	149
8.4.3. Modelo de fluidos viscosos . . . . .	150
8.4.4. Método de registro de imágenes basado en el flujo óptico . . . . .	152
8.4.5. Método de registro de splines de cuerpos elásticos . . . . .	153
8.4.6. B-Splines . . . . .	154
8.4.7. Registro de imágenes médicas usando funciones de base radial . . . . .	156
8.4.8. Otros métodos de registro . . . . .	160
8.5. Localización del núcleo subtalámico mediante el registro no rígido de atlas cerebrales . . . . .	160
8.6. Cálculo de la transformación utilizando RBFs . . . . .	163
8.6.1. Cálculo de la transformación usando RBFs sin precisión polinómica . . . . .	164
8.6.2. Cálculo de la transformación utilizando RBFs con precisión polinómica . . . . .	167
8.7. Naturaleza y localidad de la transformación al utilizar RBFs . . . . .	170
8.7.1. Naturaleza de la transformación . . . . .	170

## ÍNDICE GENERAL

---

8.7.2. Localidad de la transformación . . . . .	172
8.8. Coste computacional utilizando funciones de base radial con soporte compacto	178
8.8.1. Construcción del sistema de ecuaciones utilizando funciones de base radial con soporte compacto . . . . .	178
8.8.2. Coste de almacenamiento de la matriz del sistema . . . . .	179
8.8.3. Estabilidad . . . . .	180
8.8.4. Resolución del sistema de ecuaciones . . . . .	183
8.8.5. Evaluación de la función transformación utilizando funciones de base radial con soporte compacto . . . . .	185
8.9. Coste computacional utilizando funciones de base radial condicionalmente definidas positivas . . . . .	186
8.9.1. Construcción del sistema de ecuaciones . . . . .	186
8.9.2. Coste de almacenamiento . . . . .	186
8.9.3. Estabilidad del sistema . . . . .	187
8.9.4. Resolución del sistema de ecuaciones utilizando funciones de base radial condicionalmente definidas positivas . . . . .	188
8.9.5. Evaluación de la función transformación utilizando funciones condicionalmente definidas positivas . . . . .	188
8.10. Registro del atlas de Talairach en imágenes de Resonancia Magnética . . . . .	189
8.10.1. Coste computacional y estabilidad del sistema de ecuaciones . . . . .	193
8.10.2. Validación visual del registro en 2D . . . . .	196
8.10.3. Conclusiones . . . . .	204
<b>9. Validación cuantitativa del registro</b>	<b>205</b>
9.1. Validación usando el núcleo subtalámico . . . . .	205
9.1.1. Comparación con los resultados de otros grupos . . . . .	211
9.2. Validación usando el núcleo rojo . . . . .	214
9.2.1. Comparación con los resultados obtenidos con los de otros grupos . . . . .	218
9.3. Conclusiones . . . . .	220
<b>10. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>221</b>
10.1. Conclusiones . . . . .	221

## ÍNDICE GENERAL

---

10.2. Contribuciones de la tesis . . . . .	223
10.3. Desarrollos futuros . . . . .	224
10.4. Publicaciones relacionadas con la tesis . . . . .	226
10.4.1. Revistas . . . . .	226
10.4.2. Congresos . . . . .	226
10.4.3. Exhibiciones televisivas . . . . .	227
<b>Bibliografía</b>	<b>229</b>

# Índice de figuras

1.1. Modalidades de imagen médica . . . . .	2
1.2. Corte axial del atlas impreso de Schaltenbrand-Bailey [Scha 59] en el que aparecen identificadas diferentes estructuras anatómicas . . . . .	3
1.3. Descripción del método de registro que permite obtener el atlas deformable de Talairach-Tournoux . . . . .	7
2.1. Algunos cascos estereotácticos normalmente utilizados en neurocirugía . . . . .	12
2.2. Primera versión del aparato estereotáctico de Leksell . . . . .	20
2.3. (a) Sistema estereotáctico de Barcia et al. (b) Componentes básicos . . . . .	20
2.4. Estimulación cerebral profunda en pacientes afectados de Parkinson . . . . .	24
2.5. Localización del núcleo subtalámico en un corte coronal del atlas de Talairach-Tournoux . . . . .	25
2.6. Implantación estereotáctica de electrodos en el núcleo subtalámico . . . . .	26
2.7. Localización de los electrodos en el núcleo subtalámico tras la intervención quirúrgica . . . . .	26
3.1. Cortes de atlas impresos en los que aparecen identificadas diferentes estructuras. (a) Talairach-Tournoux Orientado a Referencias. (b) Schaltenbrand-Bailey . . . . .	32
3.2. Imagen extraída de Cerefy . . . . .	37
3.3. Cortes del atlas cerebral MNI305 . . . . .	42
3.4. Imágenes que muestran las diferencias entre el atlas de Talairach y el atlas MNI . . . . .	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.1. Corte sagital del atlas impreso de Talairach-Tournoux Orientado a Referencias en el que se muestran los planos interhemisférico, intercomisural y VCA. . . . .	46
4.2. Sistema de coordenadas de Talairach . . . . .	48
4.3. Ejemplo de imágenes de Resonancia Magnética en las que no es aconsejable la transformación de Talairach . . . . .	49
4.4. Vista de las comisuras en un corte sagital . . . . .	53
4.5. Identificación de dos puntos del plano sagital medio en imágenes de Resonancia Magnética . . . . .	54
4.6. Localización de los siguientes puntos en imágenes de Resonancia Magnética: (a) Límite superior de la comisura anterior (b) Límite inferior de la comisura anterior (c) Comisura posterior . . . . .	55
4.7. Límites del cerebro con los que se obtiene el escalado de la transformación . . . . .	56
4.8. Resultado de la transformación final . . . . .	57
4.9. Fusión del atlas de Talairach-Tournoux sobre una de las imágenes de Resonancia Magnética situada en el sistema de coordenadas de Talairach . . . . .	58
4.10. Imagen ampliada mostrando con mayor detalle los resultados del ajuste del atlas en el putamen y el núcleo caudado . . . . .	58
5.1. Reconstrucción tridimensional del atlas de Talairach-Tournoux realizada por Nowinski et al. [Nowi 97] . . . . .	63
5.2. Reconstrucción tridimensional de los ventrículos del atlas de Talairach-Tournoux realizada por Ganser [Gans 04] . . . . .	64
5.3. Relleno mediante un color del área de las estructuras . . . . .	64
5.4. Distintos tipos de zonas . . . . .	66
5.5. Reconstrucción 2D a partir de un mapa 1D . . . . .	67
5.6. Corte axial generado con el algoritmo de interpolación de cortes . . . . .	69
6.1. Operadores de derivación . . . . .	77
6.2. Máscara utilizada para calcular el Laplaciano . . . . .	78
6.3. Laplaciano de una imagen de Resonancia Magnética . . . . .	79
6.4. Ejemplo del método de crecimiento de regiones . . . . .	80
6.5. Crestas y valles . . . . .	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

6.6. Representación de la forma mediante un número finito de puntos . . . . .	84
6.7. (a) Un conjunto de 36 formas no alineadas (ventrículos cerebrales) (b) Forma media Procrustes . . . . .	86
6.8. Deformación producida sobre la forma media utilizando el primer vector propio	89
6.9. Distintos modos de variación de los ventrículos . . . . .	90
6.10. Triangulación de Delaunay de la forma de los ventrículos cerebrales. . . . .	92
6.11. Aplicación del método de segmentación de Modelos Activos de Apariencia en imagen médica . . . . .	99
6.12. Identificación manual de los ventrículos en una imagen de Resonancia Magnética utilizando la herramienta AAMTools . . . . .	101
6.13. Los modelos de los cortes axiales del atlas de Talairach-Tournoux que se encuentran a una distancia (a) +8 mm. y (b) +12 mm. se pueden agrupar en un solo modelo . . . . .	102
6.14. Forma media de los 16 primeros modelos (A-V) basados en el atlas de Talairach-Tournoux . . . . .	103
6.15. Forma media de textura de los 16 primero modelos (A-V) basados en el atlas de Talairach-Tournoux . . . . .	104
6.16. (a) Distancia entre puntos (b) Distancia de un punto a una curva . . . . .	107
6.17. Resultados de la segmentación automática utilizando Modelos Activos de Apariencia . . . . .	109
7.1. Interpolación de algunos datos dispersos usando la ecuación 7.2 . . . . .	116
7.2. Interpolación de algunos datos dispersos usando la ecuación 7.3 con $c = 2$ . .	117
7.3. Líneas de contorno de la función de Wendland: $\psi_{2,0}$ . . . . .	134
7.4. Líneas de contorno de la función de Wu . . . . .	135
8.1. Ejemplos que ilustran el problema de registro de imágenes médicas . . . . .	139
8.2. Tipo de transformaciones 2D atendiendo a su naturaleza. . . . .	143
8.3. Síndrome de Apert. . . . .	157

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

8.4. (a) Imagen objetivo (b) Imagen de referencia (c) Imagen de referencia deformada usando la Thin Plate Spline (d) Imagen de referencia deformada usando la Thin Plate Spline con atributos de orientación propuesta por Rohr et al. [Rohr 03]. . . . .	159
8.5. Registro de imágenes usando distintas funciones de base radial . . . . .	174
8.6. Transformación de la imagen usando funciones de base radial condicionalmente definidas positivas . . . . .	174
8.7. Transformación de la imagen usando la función de Wendland $\psi_{2,0,\rho}$ para distintos tamaños del soporte . . . . .	175
8.8. Diferencia entre la imagen objetivo y la imagen deformada usando funciones condicionalmente definidas positivas . . . . .	176
8.9. Diferencia entre la imagen objetivo y la imagen deformada usando la función de Wendland $\psi_{2,0,\rho}$ para distintos tamaños del soporte . . . . .	177
8.10. De izquierda a derecha. (a) Imagen objetivo (b) Imagen de referencia. . . . .	180
8.11. Dispersión de la matriz $A$ usando la función de Wendland: $\psi_{2,0,\rho}$ para distintos tamaños del soporte . . . . .	181
8.12. Distancia de separación de un conjunto de datos en $\mathbb{R}^2$ . . . . .	183
8.13. (a) Número de elementos no nulos (nz) de la parte triangular superior de la matriz $K$ antes de la descomposición de Cholesky. (b) Número de elementos no nulos de la matriz $G$ obtenida en la descomposición de Cholesky . . . . .	184
8.14. Número de elementos no nulos de la matriz $A$ usando la TPS . . . . .	187
8.15. Dispersión de la matriz $A$ usando la función de Wendland: $\psi_{2,0,\rho}$ para distintos tamaños del soporte. (a) $\rho = 1$ (b) $\rho = 15$ (c) $\rho = 30$ (d) $\rho = 70$ (e) $\rho = 100$ (f) $\rho = 200$ . . . . .	195
8.16. Aplicación que permite experimentar las propiedades del registro en el caso de las funciones de base radial en 2D . . . . .	197
8.17. Función de base radial utilizada: Función de Wendland- $\psi_{2,0}$ con tamaño del soporte $\alpha=35$ . El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el N que se encuentra en $z=+8$ . . . . .	198

## ÍNDICE DE FIGURAS

8.18. Función de base radial utilizada: Función de Wu- $\phi_{2,2}$ con tamaño del soporte $\alpha=41$ . El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el K que se encuentra en $z=+20$ . . . . .	199
8.19. Función de base radial utilizada: Función de Wendland- $\psi_{2,0}$ con tamaño del soporte $\alpha=38$ . El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el L que se encuentra en $z=+16$ . La imagen de Resonancia Magnética se ha rotado 35 grados . . . . .	200
8.20. Función de base radial utilizada: Función de Wendland- $\psi_{2,0}$ con tamaño del soporte $\alpha=29$ . El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el J que se encuentra en $z=+24$ . . . . .	201
8.21. Función de base radial utilizada: Función de Wu- $\phi_{2,2}$ con tamaño del soporte $\alpha=46$ . El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el H que se encuentra en $z=+32$ . . . . .	202
8.22. Función de base radial utilizada: Thin Plate Spline. El corte axial utilizado del atlas de Talairach-Tournoux es el O que se encuentra en $z=+4$ . . . . .	203
9.1. Imágenes en las que se muestra la localización final de los electrodos y por ende de los núcleos subtalámicos . . . . .	207
9.2. Cortes axiales del atlas de Talairach-Tournoux en los que aparece el núcleo subtalámico . . . . .	208
9.3. Error medio en mm. ( $E$ ) al localizar el núcleo subtalámico . . . . .	211
9.4. Desviación típica en mm. ( $SD$ ) asociada al error medio $E$ . . . . .	212
9.5. Ejemplos que muestran la localización del núcleo rojo en una imagen de Resonancia Magnética potenciada en T2 . . . . .	215
9.6. Localización del núcleo rojo en distintos cortes axiales del atlas de Talairach-Tournoux . . . . .	216
9.7. Error medio en mm. ( $E$ ) al localizar el núcleo subtalámico variando el tamaño del soporte en las funciones de base radial . . . . .	218
9.8. Desviación típica en mm. ( $SD$ ) asociada al error medio $E$ . . . . .	219



# Índice de tablas

4.1. Aplicaciones que realizan la transformación de Talairach . . . . .	52
5.1. Distancia en mm. entre los cortes del atlas de Talairach-Tournoux . . . . .	62
6.1. Tabla comparativa atendiendo al grado de interacción que puede realizar un usuario al realizar la segmentación . . . . .	73
6.2. Información de los 18 modelos creados a partir de los cortes axiales del atlas de Talairach-Tournoux. . . . .	102
6.3. Modos de variación del modelo K . . . . .	106
6.4. Error pt.crv. al segmentar nuevas imágenes con los modelos creados . . . . .	108
6.5. Error pt.pt. al segmentar nuevas imágenes con los modelos creados . . . . .	110
6.6. Coeficiente de Jaccard al segmentar nuevas imágenes con los modelos creados	111
8.1. Medidas de similitud comúnmente usadas . . . . .	141
8.2. Tabla extraída del artículo de Hagemann et al. [Hage 99] donde se observan los coeficientes de Lamé del cerebro, así como el módulo de Young, $E$ , y el coeficiente de Poisson, $\nu$ , obtenidos por diferentes autores . . . . .	151
8.3. Número de condición de la matriz del sistema. . . . .	182
8.4. Coste temporal empleado en la resolución del sistema de ecuaciones . . . . .	193
8.5. Número de elementos no nulos de la matriz del sistema junto con su número de condición . . . . .	194
9.1. Información sobre las imágenes de Resonancia Magnética de cada uno de los pacientes . . . . .	209
9.2. Coordenadas de la imagen del núcleo subtalámico izquierdo y derecho . . . . .	209

## ÍNDICE DE TABLAS

---

9.3. Coordenadas de la imagen de la comisura anterior y comisura posterior . . .	210
9.4. Error medio cometido por Castro et al. [Cast 06b] al localizar el núcleo subtalámico usando distintos métodos de registro . . . . .	213
9.5. Error cometido por Guo et al. [Guo 06a] al localizar el núcleo subtalámico usando distintos métodos . . . . .	214
9.6. Error medio cometido por Stancello et al. [Stan 07] al localizar el núcleo rojo en distintos pacientes . . . . .	220