



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Tesis Doctoral

Detección del Movimiento Cardíaco mediante Técnicas de Registro Elástico

Autora

MARÍA JESÚS LEDESMA CARBAYO
Ingeniero de Telecomunicación

Directores de Tesis

ANDRÉS DE SANTOS LLEÓ
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

MANUEL DESCO MENÉNDEZ
Doctor en Medicina e Ingeniero de Telecomunicación

2003

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 16 de octubre de 2003

PRESIDENTE: *Javier Ferreras López*

VOCAL: *José Kybic*

VOCAL: *Alejandro Fraugi*

VOCAL: *Miguel A. García Fernández*

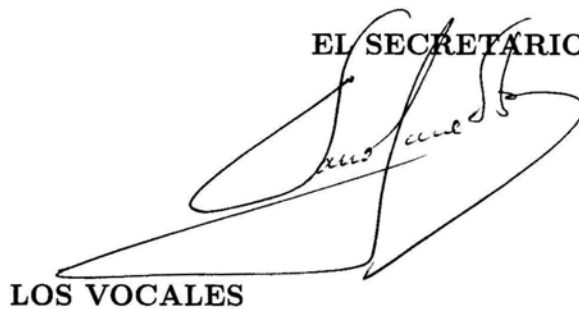
SECRETARIO: *Narciso García Sento*

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 10 de Noviembre del 2003, en Madrid, acuerda otorgarle la calificación de: *Sobresaliente Cum Laude* por unanimidad de los miembros del Tribunal

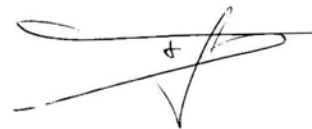
EL PRESIDENTE



EL SECRETARIO



LOS VOCALES



Resumen

Esta Tesis Doctoral profundiza en el estudio de métodos de registro elástico para la estimación de movimiento. Se centra en la estimación del movimiento cardiaco a partir de secuencias de imágenes de ecocardiografía. Las técnicas propuestas en esta Tesis Doctoral pueden aportar datos cuantitativos y objetividad en el análisis de la función regional del ventrículo izquierdo, que generalmente se realiza de forma cualitativa por inspección visual.

Se proponen nuevos métodos de registro elástico espacio-temporal para la estimación del movimiento a partir de una secuencia de imágenes. La aplicación específica es la estimación del campo de desplazamiento cardiaco a partir de secuencias bidimensionales de ultrasonidos. La idea básica es encontrar la deformación espacio-temporal que compensa el movimiento de la secuencia. La clave del método es el uso de modelos de transformación paramétricos semilocales, que permiten controlar la suavidad de la transformación. Se utilizan métodos de optimización multirresolución para asegurar velocidad y robustez en el proceso. El campo de desplazamiento es el punto de partida para el cálculo de otros parámetros que caracterizan el movimiento del miocardio, como la velocidad o la deformación local (*strain*).

Los métodos propuestos se ajustan y validan sobre secuencias sintéticas que simulan el movimiento del corazón y el proceso de adquisición de las imágenes de ecografía. Estas secuencias permiten estimar la exactitud de los métodos propuestos en distintas circunstancias de ruido, así como ajustar sus parámetros adecuadamente.

Por otra parte, se han validado los resultados obtenidos sobre imágenes reales con otro método de medida del movimiento, como es la técnica de Doppler Tisular. Los métodos propuestos aportan una ventaja fundamental sobre las técnicas Doppler como es el cálculo de todas las componentes del movimiento y no únicamente la proyección del movimiento sobre el haz de ultrasonidos.

Por último, los métodos propuestos se han aplicado al estudio del análisis regional del ventrículo izquierdo en un conjunto de secuencias de enfermos isquémicos y voluntarios sanos. Se confirma que la propuesta permite obtener diferencias significativas entre segmentos normales y patológicos, ilustrando su aplicabilidad clínica.

Abstract

The main topic of this PhD Thesis is spatio-temporal elastic registration for motion estimation. The work focus on the cardiac motion estimation from echocardiographic sequences. The approaches presented in this Thesis provide quantitative data to the regional analysis of the left ventricle, normally performed qualitatively by visual inspection.

We propose new spatio-temporal elastic registration algorithms for motion reconstruction from a series of images. The specific application is to estimate displacement fields from 2D ultrasound sequences of the heart. The basic idea is to find a spatio-temporal deformation field that effectively compensates for the motion. The key feature of our method is the use of semi-local parametric models of the deformation using splines which provide controlled smoothness. Our approach uses a multiresolution optimization strategy for higher computation speed and robustness. We derive additional parameters from the displacement field, such as local velocity and strain.

The methods proposed are adjusted and validated on synthetic sequences that simulate ultrasound images and the cardiac motion. These sequences provide a good framework to estimate the accuracy of our algorithms and to adjust the parameters to fulfil the problem requirements.

Moreover, we validated the results on real sequences by comparing with another motion detection technique, Tissue Doppler Imaging. The proposed approach have a great advantage over Doppler techniques as it provides all the motion components and not only the projection of the motion on the ultrasound beam direction.

Finally, we apply the proposed methods to the regional analysis of the left ventricle on a set of ultrasound sequences from ischemic patients and healthy volunteers. Results show significant differences between normal and pathological segments, thereby illustrating the clinical applicability of the method proposed.

Índice

Resumen	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Agradecimientos	vii
Índice	xi
1 Motivación y objetivos	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Diseño e implementación de métodos de registro elástico espacio-temporal	3
1.2.2 Validación y aplicabilidad clínica de los métodos propuestos	4
1.3 Estructura del documento	5
2 Introducción	7
2.1 Anatomía y fisiología cardiovascular	7
2.1.1 Introducción al sistema circulatorio	7
2.1.2 Anatomía y fisiología cardiacas	8
2.2 Cardiopatía Isquémica	14

2.2.1	Epidemiología de las enfermedades cardiovasculares	14
2.2.2	Fisiopatología de la cardiopatía isquémica	15
2.2.3	Principales síndromes isquémicos	16
2.2.4	Alteraciones de la función contráctil debidas a la cardiopatía isquémica	18
2.3	Ecocardiografía	19
2.3.1	Fundamentos físicos	19
2.3.2	Formación de la imagen	23
2.3.3	El estudio ecocardiográfico	26
2.3.4	Características de las secuencias ecocardiográficas	28
2.4	Valoración del movimiento regional del ventrículo izquierdo	30
2.4.1	Valoración de la contractilidad segmentaria	31
2.4.2	Métodos de estrés para la valoración de la contractilidad segmentaria	33
2.4.3	Técnicas emergentes	33
2.5	Resumen	35
3	Antecedentes	37
3.1	Detección automática de la dinámica cardíaca	37
3.2	Contornos activos y modelos deformables	38
3.2.1	Seguimiento de contornos en secuencias cardíacas	39
3.2.2	Incorporación de conocimiento <i>a priori</i>	40
3.2.3	Modelos deformables volumétricos	40
3.3	Técnicas de registro de imágenes	41
3.3.1	Espacio de características	42
3.3.2	Métrica de similitud	44
3.3.3	Espacio de búsqueda	45
3.3.4	Estrategia de búsqueda	46
3.3.5	Registro y movimiento cardíaco	49

3.4	Estado de la técnica	51
4	Detección del movimiento cardiaco mediante técnicas de registro elástico	53
4.1	Descripción del problema	53
4.2	Hipótesis de diseño	55
4.3	Registro elástico secuencial	56
4.3.1	Descripción del algoritmo	57
4.3.2	Método de registro elástico	58
4.3.3	Restricciones del campo de desplazamiento	60
4.3.4	Validación y ajustes mediante datos simulados	62
4.4	Registro elástico espacio-temporal	66
4.4.1	Descripción del algoritmo	67
4.4.2	Criterio de optimización	68
4.4.3	Modelo de movimiento espacio-temporal	70
4.4.4	Restricciones del campo de desplazamiento	71
4.4.5	Multirresolución y estrategia de optimización	71
4.4.6	Detalles de la implementación	72
4.4.7	Validación y ajustes mediante datos simulados	75
4.5	Discusión	84
5	Validación y aplicabilidad clínica	89
5.1	Introducción	89
5.2	Parámetros de la dinámica cardiaca	89
5.2.1	Desplazamiento	90
5.2.2	Velocidad	91
5.2.3	Tensor de deformación	92
5.3	Validación versus Doppler Tisular	94
5.3.1	Doppler Tisular	94

5.3.2	Metodología de la validación	95
5.3.3	Resultados y Discusión	96
5.3.4	Conclusiones	100
5.4	Aplicación al análisis regional del ventrículo izquierdo	101
5.4.1	Descripción de los datos y metodología	101
5.4.2	Resultados y discusión	103
5.4.3	Conclusiones	107
5.5	Resumen	108
6	Conclusiones	111
7	Líneas Futuras	113
	Bibliografía	115
	Publicaciones desarrolladas en el marco de esta Tesis Doctoral	131