

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>PALABRAS CLAVE</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE GRÁFICAS Y TABLAS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>PUBLICACIONES</b> .....	<b>XV</b>
<b>AUTORÍA</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1.- La cirugía .....	3
1.2.- Cirugía laparoscópica .....	5
1.2.1.- <i>Introducción</i> .....	5
1.2.2.- <i>Presente y futuro de la cirugía laparoscópica</i> .....	9
1.2.3.- <i>El procedimiento. Ventajas e inconvenientes</i> .....	14
1.3.- La informática médica .....	18
1.3.1.- <i>Introducción</i> .....	18
1.3.2.- <i>Robótica y medicina</i> .....	19
1.3.3.- <i>Realidad virtual y medicina</i> .....	20
1.4.- Los simuladores quirúrgicos .....	23
1.4.1.- <i>Introducción</i> .....	23
1.4.2.- <i>Componentes de un SQ</i> .....	25
1.4.3.- <i>Perspectivas</i> .....	27
1.5.- Objetivos de la tesis .....	28
1.6.- Resumen .....	28
<b>CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE EN MODELOS DEFORMABLES EN TIEMPO REAL</b> .....	<b>31</b>
2.1.- <i>Introducción</i> .....	33

2.2.- Aproximaciones heurísticas .....	35
2.2.1.- Splines deformables .....	35
2.2.2.- Modelos masa-muelle .....	36
2.2.3.- Volúmenes ligados .....	40
2.2.3.1.- Modelo básico .....	40
2.2.3.2.- Modelo Chain-mail .....	41
2.2.4.- Modelo masa-tensor .....	42
2.3.- Aproximaciones mecánica continua .....	44
2.3.1.- Método Elementos Finitos (FEM) .....	44
2.3.1.1.- Relaciones básicas .....	44
2.3.1.2.- Elementos finitos rápidos (Fast finite elements FFE) .....	45
2.3.1.3.- Sistemas dinámicos .....	46
2.3.1.4.- Precomputación de tensores .....	47
2.3.1.5.- Otras aproximaciones .....	48
2.3.2.- Método de Elementos de Contorno (BEM) .....	48
2.4.- Modelo híbrido .....	50
2.5.- Comparativa .....	51
2.6.- Conclusiones .....	53
2.7.- Resumen .....	54
<b>CAPÍTULO 3.- EL MODELO BASADO EN UN SISTEMA DE</b>	
<b>PARTÍCULAS .....</b>	<b>57</b>
3.1.- Introducción .....	59
3.2.- Descripción del modelo ParSys .....	61
3.2.1.- Introducción .....	61
3.2.2.- Preproceso .....	63
3.2.3.- Cálculos por frame .....	67
3.2.3.1.- Colisiones y respuesta a colisiones .....	67
3.2.3.2.- Deformación del sistema de partículas .....	70
3.2.3.3.- Deformación del modelo triangular .....	71
3.2.3.4.- Cortes producidos sobre el modelo .....	72
3.3.- Los modelos físicos .....	76
3.3.1.- Introducción .....	76
3.3.2.- Muelles .....	76
3.3.3.- Eslabones .....	77
3.3.4.- Campos potenciales .....	80
3.4.- Resumen .....	82
<b>CAPÍTULO 4.- RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>

4.1.- Introducción .....	87
4.2.- Los modelos de partículas .....	88
4.2.1.- <i>Introducción</i> .....	88
4.2.2.- <i>ParSys: Estudio del coste temporal</i> .....	89
4.2.3.- <i>ParSys: Estudio cualitativo</i> .....	91
4.3.- ParSys vs BEM y T2Mesh .....	94
4.3.1.- <i>Introducción</i> .....	94
4.3.2.- <i>Comparativa del coste temporal de los tres modelos</i> .....	94
4.3.3.- <i>Estudio cualitativo modelos</i> .....	95
4.4.- Conclusiones .....	97
<b>CAPÍTULO 5.- RESUMEN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>
5.1.- Resumen .....	101
5.2.- Contribuciones de la tesis .....	102
5.3.- Desarrollos futuros .....	103
<b>ANEXO I.- EL MODELO T2MESH .....</b>	<b>105</b>
I.1.- Introducción .....	107
I.2.- Las mallas simples tipo 2 .....	107
<b>ANEXO II.- EL MODELO BEM .....</b>	<b>111</b>
II.1.- Introducción .....	113
II.2.- Los BEM .....	113
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>121</b>

# LISTA DE FIGURAS

<i>Fig. 1.1: Ilustración de una sala de operaciones a principios del siglo XIX .....</i>	4
<i>Fig. 1.2: Posibles puntos de entrada de la cámara operaciones de laparoscopia..</i>	14
<i>Fig. 1.3: Principios de la laparoscopia .....</i>	16
<i>Fig. 1.4: Colectomía laparoscópica (extracción de vesícula biliar).....</i>	17
<i>Fig. 1.5: Sistema D'VINCI .....</i>	20
<i>Fig. 1.6: Representación de información.....</i>	21
<i>Fig. 1.7: Diseño: Programa de CAD.....</i>	21
<i>Fig. 1.8: Usos Informática gráfica.....</i>	22
<i>Fig. 1.9: Usos Informática gráfica: Videojuegos, uno de los mayores impulsores de la informática gráfica.....</i>	22
<i>Fig. 1.10: Clasificación de los simuladores quirúrgicos.....</i>	24
<i>Fig. 1.11: Ciclo cerrado de simulación en los simuladores quirúrgicos.....</i>	25
<i>Fig. 1.12: Dispositivos hápticos para la simulación de cirugía laparoscópica.....</i>	26
<i>Fig. 1.13: Ciclo básico de simulación de un simulador quirúrgico.....</i>	27
<i>Fig. 2.1: Clasificación de modelos deformables para Simulación quirúrgica.....</i>	35
<i>Fig. 2.2: Tipos de mallas masa-muelle.....</i>	37
<i>Fig. 2.3: Deformación de una vesícula modelada con un modelo masa-muelle.....</i>	39
<i>Fig. 2.4: Deformación de un cubo discretizado mediante volúmenes ligados.....</i>	40
<i>Fig. 2.5: Algoritmo chain mail.....</i>	41
<i>Fig. 2.6: Deformación de un hígado modelado con el método de elementos de contorno.....</i>	49
<i>Fig. 2.7: Gráfico comparativo entre los modelos deformables.....</i>	53
<i>Fig. 3.1: Escenarios de Simulación Quirúrgica.....</i>	61
<i>Fig. 3.3: Ejemplos de usos de sistemas de partículas.....</i>	62

<i>Fig. 3.4: Pasos en la generación de un sistema de partículas a partir de un modelo triangular 3D.....</i>	64
<i>Fig. 3.5: En 2D, conexiones entre partículas.....</i>	64
<i>Fig. 3.6: Artificios producidos al mover los vértices de un modelo 3D con una asociación 1 a 1 de un sistema de partículas girado.....</i>	66
<i>Fig. 3.7: Voxels a partir de un sistema de partículas.....</i>	67
<i>Fig. 3.8: Creación de una jerarquía de esferas a partir del modelo ParSys, en particular de dos niveles.....</i>	68
<i>Fig. 3.9: Desplazamiento y propagación de las fuerzas entre partículas, producido por el movimiento del instrumental.....</i>	69
<i>Fig. 3.10: Cálculo de las distancias iniciales de un vértice (en rojo) a las caras de su correspondiente voxel (en 2D).....</i>	71
<i>Fig. 3.11: Cálculo de la nueva posición de un vértice a partir del sistema de partículas deformado (2D).....</i>	72
<i>Fig. 3.12: Casos de cortes realizados sobre un triángulo del modelo de visualización.....</i>	74
<i>Fig. 3.13: Cortes sobre un triángulo, y triangulación realizada para cada uno de ellos para cada uno de los casos de corte.....</i>	75
<i>Fig. 3.14: Deformación de una malla de muelles 2D.....</i>	77
<i>Fig. 3.15: Región de movimiento de una partícula relativo a su vecino izquierdo y su vecino de abajo.....</i>	78
<i>Fig. 3.16: Deformación de un modelo 2D ChainMail cuando un elemento es movido.....</i>	79
<i>Fig. 4.1: Ejemplo de Corte producido sobre un modelo de partículas.....</i>	88
<i>Fig. 4.2: Modelos triangulares y de partículas utilizados en las pruebas.....</i>	90

# LISTA DE GRÁFICAS Y TABLAS

<i>Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de la cirugía laparoscópica.....</i>	15
<i>Tabla 2.1. Comparativa entre los modelos deformables.....</i>	52
<i>Tabla 3.1. Características principales de los modelos T2Mesh y BEM.....</i>	60
<i>Tabla 3.2. Parámetros de un objeto partícula.....</i>	63
<i>Tabla. 4.1: Coste temporal medido para el modelo de partículas.....</i>	91
<i>Tabla. 4.2: Evaluación cualitativa de los modelos ParSys.....</i>	93
<i>Tabla. 4.3: Coste temporal medido para BEM y T2Mesh.....</i>	94
<i>Tabla. 4.4: Evaluación cualitativa de los modelos ParSys muelles, BEM y T2Mesh.....</i>	96
<i>Gráfica. 4.1: Comparativa del coste temporal medido para el modelo de partículas para mallas de diferente resolución y con diferentes sistemas de partículas asociados.....</i>	91
<i>Gráfica. 4.2: Comparativa del coste temporal medido para el modelo de partículas basado en muelles, el modelo BEM y el modelo T2Mesh para mallas de diferente resolución.....</i>	95