

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.1.1. Fundamentación general . . . . .	1
1.1.2. Definición del problema a abordar . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivos generales . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Hipótesis . . . . .	4
1.4. Metodología . . . . .	4
1.5. Aportes del trabajo de tesis . . . . .	4
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	5
<b>2. Definiciones y Estado del arte</b>	<b>6</b>
2.1. Definiciones . . . . .	6
2.1.1. Háptica . . . . .	6
2.1.2. Dispositivo de interfaz háptica <i>Phantom Omni</i> . . . . .	8
2.1.3. Teleoperación Maestro-Esclavo . . . . .	9
2.1.4. Brazo robótico . . . . .	9
2.1.5. Cámaras RGB-D y <i>Point Clouds</i> . . . . .	10
2.1.6. <i>Voxel</i> y <i>Octree</i> . . . . .	11
2.1.7. Cinemática directa . . . . .	12
2.1.8. Cinemática inversa . . . . .	13
2.1.9. Prueba-T para muestras apareadas . . . . .	14
2.1.10. <i>ROS: Robot Operating System</i> . . . . .	15
2.1.11. <i>Hardware-in-the-loop simulation</i> . . . . .	16
2.1.12. <i>Gazebo</i> . . . . .	16
2.2. Estado del arte . . . . .	18
2.2.1. Teleoperación Maestro-Esclavo Háptica de brazo robótico . . . . .	18
2.2.2. Teleoperación con retardo temporal . . . . .	19
2.2.3. Clasificación de Sistemas de Teleoperación . . . . .	21
2.2.4. Sistemas virtuales en la teleoperación . . . . .	22
2.2.5. Algoritmos hápticos basados en <i>Point Clouds</i> . . . . .	25
2.2.6. Evaluación de interfaces hápticas . . . . .	25
2.2.7. Aplicaciones de teleoperación . . . . .	26
2.3. Discusión . . . . .	27

<b>3. Desarrollo de Sistema de Teleoperación Háptico Propuesto</b>	<b>28</b>
3.1. Descripción general . . . . .	28
3.2. Etapas del sistema de teleoperación . . . . .	30
3.3. Método de renderizado háptico . . . . .	32
3.4. Fuerza de retroalimentación háptica . . . . .	35
3.4.1. Cálculo de Fuerza . . . . .	35
3.5. Ciclo general de algoritmo háptico . . . . .	36
3.6. Brazo robótico . . . . .	37
3.6.1. Simulación del robot en <i>Gazebo</i> . . . . .	37
3.7. Servidor de <i>Point Clouds</i> . . . . .	39
3.7.1. Entorno virtual . . . . .	39
3.7.2. Ruta de colisión . . . . .	40
3.8. Calibración de posición de la cámara . . . . .	41
3.9. Controlador <i>Phantom Omni</i> . . . . .	42
3.9.1. <i>Workspace</i> proporcional . . . . .	43
3.9.2. <i>Deltas</i> de movimientos del efector . . . . .	44
3.10. Latencia Bilateral . . . . .	46
3.11. Precisión del Sistema . . . . .	46
3.12. Marcadores de visualización en <i>Rviz</i> . . . . .	47
3.13. Interfaz gráfica para el usuario . . . . .	49
<b>4. Validación Experimental</b>	<b>51</b>
4.1. Configuración Experimental . . . . .	51
4.1.1. Dispositivos utilizados . . . . .	51
4.1.2. Robot <i>KUKA KR 6-2</i> . . . . .	52
4.1.3. Panel de Pruebas . . . . .	54
4.1.4. Software de control y <i>API</i> . . . . .	54
4.1.5. Parámetros del Software . . . . .	57
4.2. Usuarios . . . . .	58
4.3. Procedimiento de los experimentos . . . . .	58
<b>5. Resultados y Análisis</b>	<b>61</b>
5.1. Fuerza de retroalimentación . . . . .	61
5.2. Resultados de Trayectoria 2D . . . . .	63
5.2.1. Trayectoria 2D: Error promedio de posición del efector . . . . .	64
5.2.2. Trayectoria 2D: Error promedio de posición del efector en función del tiempo . . . . .	66
5.2.3. Trayectoria 2D: Número de colisiones . . . . .	67
5.2.4. Trayectoria 2D: Número de ajustes de posición y Tiempo promedio de teleoperación . . . . .	68
5.3. Resultados de Trayectoria 3D . . . . .	69
5.3.1. Trayectoria 3D: Error promedio de posición del efector . . . . .	70
5.3.2. Trayectoria 3D: Error promedio de posición del efector en función del tiempo . . . . .	70
5.3.3. Trayectoria 3D: Número de colisiones . . . . .	71
5.3.4. Trayectoria 3D: Número de ajustes de posición y Tiempo promedio de teleoperación . . . . .	72

5.4. Análisis General . . . . .	73
<b>6. Conclusiones</b>	<b>75</b>
6.1. Trabajos futuros . . . . .	76
<b>Bibliografía</b>	<b>77</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>83</b>
7.1. Mapa de Nodos <i>ROS</i> . . . . .	83
7.2. Instrucciones de encendido robot <i>KUKA KR 6-2</i> y ejecución del programa de teleoperación . . . . .	86
7.3. Instrucciones de movimiento manual robot <i>KUKA KR 6-2</i> . . . . .	91
7.4. Masterización robot <i>KUKA KR 6-2</i> . . . . .	92
7.5. Errores frecuentes en robot <i>KUKA KR 6-2</i> . . . . .	92
7.6. Instrucciones de apagado robot <i>KUKA KR 6-2</i> . . . . .	93
7.7. Error de conexión <i>Phantom Omni</i> . . . . .	93
7.8. Integración de <i>Kinect</i> en <i>ROS</i> . . . . .	94
7.9. Paquetes y códigos fuente . . . . .	95
7.10. Comandos útiles del proyecto y de <i>ROS</i> . . . . .	97
7.11. Imágenes de la interfaz de usuario . . . . .	99

# Índice de tablas

4.1. Ángulos para posición <i>home</i> según dos sistemas de referencia . . . . .	53
4.2. Parámetros usados en la evaluación experimental . . . . .	57
5.1. Número de ajustes de posición promedio y Tiempo promedio de teleoperación - Camino verde (2D) . . . . .	68
5.2. Número de ajustes de posición promedio y Tiempo promedio de teleoperación - Camino rojo (3D) . . . . .	73
7.1. Paquetes de <i>ROS</i> desarrollados. . . . .	95

# Índice de figuras

2.1.	Dispositivo de lectura <i>Braille</i> .	7
2.2.	<i>Joystick</i> vibrotáctil.	7
2.3.	<i>Dexmo</i> exoesqueleto para las manos.	7
2.4.	Dispositivo háptico <i>SensAble Phantom Desktop</i> .	8
2.5.	<i>Phantom Omni</i> joints y botones.	8
2.6.	Elementos de un brazo robótico.	10
2.7.	Cámara RGB-D <i>Kinect</i> .	11
2.8.	Captura de <i>Point Cloud</i> .	11
2.9.	Voxel grid	12
2.10.	Esquema de Octree	12
2.11.	Ejemplo cinemáticas.	13
2.12.	Teleoperación en la Estación Espacial Internacional.	20
2.13.	Telescopio Espacial Hubble.	20
2.14.	Campo Potencial Artificial	23
2.15.	Espacio de Configuración	24
3.1.	Esquema teleoperación háptica	28
3.2.	Arquitectura de comunicación en teleoperación	30
3.3.	<i>Robot-shadow</i> y <i>robot-real</i>	31
3.4.	Elementos del Método de renderizado háptico	32
3.5.	Estados del <i>proxy</i>	34
3.6.	Diagrama de fuerza de retroalimentación háptica	35
3.7.	Ciclo general del algoritmo háptico	36
3.8.	Brazo robótico simulado en <i>Gazebo</i>	38
3.9.	<i>Point Cloud</i> con y sin filtro	40
3.10.	Detección de <i>voxel</i> ocupado	41
3.11.	Detección de <i>voxel</i> ocupado con marcador de trayectoria	41
3.12.	Dispositivo de interfaz háptica <i>Phantom Omni</i>	42
3.13.	Arquitectura de control Maestro-Esclavo	44
3.14.	Teleoperación <i>Phantom Omni</i> por zonas	45
3.15.	Desempeño tamaño de <i>voxel</i> y precisión de <i>proxy</i>	47
3.16.	Marcadores en <i>Rviz</i> sin robot	48
3.17.	Marcadores en <i>Rviz</i> con robot	48
3.18.	Interfaz gráfica para el usuario	48
4.1.	Robot industrial <i>KUKA KR 6-2</i>	52

4.2.	<i>KUKA</i> en posición <i>home</i> . . . . .	54
4.3.	Panel de pruebas hápticas . . . . .	55
4.4.	Esquema del nodo <i>ROBOTIC ARM DRIVER</i> . . . . .	57
4.5.	Trayectorias objetivo para teleoperación en panel de pruebas . . . . .	59
4.6.	<i>KUKA</i> real y simulado . . . . .	59
5.1.	Fuerza háptica y posición <i>proxy</i> - <i>HIP</i> 01 . . . . .	62
5.2.	fuerza háptica y posición <i>proxy</i> - <i>HIP</i> 02 . . . . .	62
5.3.	Fuerza háptica y posición <i>proxy</i> - <i>HIP</i> 03 . . . . .	63
5.4.	Trayectorias de teleoperación - Camino verde (2D) . . . . .	64
5.5.	Error promedio de la posición del efector - Camino verde (2D) . . . . .	65
5.6.	Error promedio de posición del efector en función del tiempo - Camino verde (2D) . . . . .	66
5.7.	Número de colisiones promedio - Camino verde (2D) . . . . .	67
5.8.	Trayectorias de teleoperación - Camino rojo (3D) . . . . .	69
5.9.	Error promedio de la posición del efector - Camino rojo (3D) . . . . .	70
5.10.	Error promedio de posición del efector en función del tiempo - Camino rojo (3D) . . . . .	71
5.11.	Número de colisiones promedio - Camino rojo (3D) . . . . .	72
6.1.	Brazo robótico con martillo neumático simulado . . . . .	76
7.1.	<i>KUKA workspace</i> . . . . .	83
7.2.	Mapa de nodos <i>ROS</i> completo . . . . .	84
7.3.	Mapa de nodos <i>ROS</i> en torno a <i>omni1</i> . . . . .	85
7.4.	Mapa de nodos <i>ROS</i> en torno a <i>pc server</i> . . . . .	85
7.5.	Mapa de nodos <i>ROS</i> en torno a <i>tf</i> . . . . .	85
7.6.	Gabinete del robot <i>KUKA</i> . . . . .	86
7.7.	Conexiones en gabinete del robot <i>KUKA</i> . . . . .	87
7.8.	Conexiones en gabinete del robot <i>KUKA</i> y <i>Kinect</i> . . . . .	87
7.9.	Switch encendido <i>KUKA</i> . . . . .	88
7.10.	Control de mando <i>KUKA</i> . . . . .	89
7.11.	<i>Mode Selector SWITCH</i> - Automatic . . . . .	89
7.12.	Esquema botones principales del control de mando . . . . .	90
7.13.	Vista posterior del control de mando . . . . .	90
7.14.	<i>Mode Selector SWITCH</i> - T1 (Test 1) . . . . .	91
7.15.	Opciones de operación manual <i>KUKA</i> . . . . .	91
7.16.	<i>Mode Selector SWITCH</i> - T2 (Test 2) . . . . .	92
7.17.	Interfaz de usuario 01 . . . . .	99
7.18.	Interfaz de usuario 02 . . . . .	99
7.19.	Interfaz de usuario 03 . . . . .	100
7.20.	Interfaz de usuario 04 . . . . .	100