

# Tabla de Contenido

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. Introducción</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1. Contexto . . . . .                           | 1        |
| 1.2. Problema . . . . .                           | 2        |
| 1.3. Objetivos . . . . .                          | 3        |
| 1.4. Descripción general de la solución . . . . . | 4        |
| <b>2. Marco teórico</b>                           | <b>6</b> |
| 2.1. Transformaciones espaciales . . . . .        | 6        |
| 2.2. Modelos articulados . . . . .                | 9        |
| 2.3. Mapas de altura . . . . .                    | 9        |
| 2.4. Cinemática . . . . .                         | 9        |
| 2.4.1. Cadenas articuladas . . . . .              | 9        |
| 2.4.2. Cinemática directa . . . . .               | 10       |
| 2.4.3. Cinemática inversa . . . . .               | 11       |
| 2.5. Curvas linealmente interpoladas . . . . .    | 12       |
| 2.6. Descenso de gradiente . . . . .              | 13       |
| 2.7. La caminata humana . . . . .                 | 13       |
| 2.8. El MonaEngine . . . . .                      | 14       |
| 2.8.1. Modelo de game objects . . . . .           | 14       |
| 2.8.2. Mallas geométricas . . . . .               | 15       |
| 2.8.3. Manejo del tiempo . . . . .                | 15       |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.8.4.    | Sistema de animación . . . . .                                    | 15        |
| <b>3.</b> | <b>Estado del arte</b>  | <b>18</b> |
| 3.1.      | Métodos para resolver el problema de IK . . . . .                 | 18        |
| 3.1.1.    | Métodos analíticos . . . . .                                      | 18        |
| 3.1.2.    | Métodos numéricos . . . . .                                       | 19        |
| 3.1.3.    | Métodos basados en datos . . . . .                                | 21        |
| 3.1.4.    | Métodos híbridos . . . . .  | 22        |
| 3.2.      | Uso de IK para generar movimientos de locomoción bípeda . . . . . | 23        |
| <b>4.</b> | <b>Solución</b>   | <b>26</b> |
| 4.1.      | Arquitectura de la solución . . . . .                             | 26        |
| 4.2.      | Clases nucleares del sistema . . . . .                            | 26        |
| 4.2.1.    | IKRig . . . . .   | 26        |
| 4.2.2.    | IKAnimation . . . . .   | 29        |
| 4.2.3.    | IKChain . . . . .   | 30        |
| 4.3.      | Orientación global y sistema de referencia . . . . .              | 30        |
| 4.4.      | Tiempos del sistema . . . . .                                     | 30        |
| 4.4.1.    | Tiempo de animación . . . . .                                     | 31        |
| 4.4.2.    | Tiempo de animación extendido . . . . .                           | 32        |
| 4.4.3.    | Tiempo de reproducción . . . . .                                  | 32        |
| 4.4.4.    | Reproducción de frames . . . . .                                  | 33        |
| 4.5.      | Descenso de gradiente . . . . .                                   | 33        |
| 4.6.      | Cinemática . . . . .  | 35        |
| 4.6.1.    | Cinemática directa . . . . .                                      | 35        |
| 4.6.2.    | Cinemática inversa . . . . .                                      | 35        |
| 4.7.      | Información del entorno . . . . .                                 | 41        |
| 4.7.1.    | Mapas de altura . . . . .   | 41        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.7.2.    | EnvironmentData . . . . .   | 42        |
| 4.7.3.    | Terrenos . . . . .  | 42        |
| 4.8.      | Generación de trayectorias . . . . .                                | 42        |
| 4.8.1.    | Curvas linealmente interpoladas . . . . .                           | 42        |
| 4.8.2.    | Extracción de trayectorias base . . . . .                           | 44        |
| 4.8.3.    | TrajectoryGenerator . . . . .                                       | 45        |
| 4.8.4.    | Trayectorias para end effectors . . . . .                           | 46        |
| 4.8.5.    | Corrección de trayectorias dinámicas . . . . .                      | 48        |
| 4.8.6.    | Trayectorias para la cadera . . . . .                               | 50        |
| 4.8.7.    | Trayectorias fijas y validación de trayectorias dinámicas . . . . . | 51        |
| 4.9.      | Control del sistema e interfaz de usuario . . . . .                 | 51        |
| 4.9.1.    | IKNavigationComponent . . . . .                                     | 51        |
| 4.9.2.    | IKRigController . . . . .   | 53        |
| 4.9.3.    | IKNavigationSystem . . . . .  | 55        |
| 4.10.     | Preprocesamiento de las animaciones . . . . .                       | 56        |
| 4.10.1.   | Validación . . . . .  | 56        |
| 4.10.2.   | Descompresión de las rotaciones . . . . .                           | 58        |
| <b>5.</b> | <b>Validación</b>   | <b>59</b> |
| 5.1.      | Rendimiento de la solución . . . . .                                | 61        |
| 5.2.      | Percepción de los usuarios . . . . .                                | 63        |
| <b>6.</b> | <b>Conclusiones</b>   | <b>66</b> |
| 6.1.      | Valoración de los resultados . . . . .                              | 67        |
| 6.2.      | Reflexiones . . . . .   | 69        |
| 6.3.      | Trabajo futuro . . . . .  | 70        |
|           | <b>Bibliografía</b>   | <b>73</b> |
|           | <b>Anexo A.</b>   | <b>75</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| A.1. Diagrama UML . . . . .   | 75        |
| A.2. Diagrama de flujo . . . . .  | 76        |
| <b>Anexo B.</b>   | <b>77</b> |
| B.1. Matriz de rotación en función de un ángulo y eje arbitrarios . . . . . | 77        |
| B.2. Enlace al repositorio de la solución . . . . .                         | 77        |