

# Contenido

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Prólogo</b>                                                         | <b>XII</b> |
| <b>Capítulo 1 Antecedentes de la robótica</b>                          | <b>1</b>   |
| 1.1. Introducción . . . . .                                            | 2          |
| 1.2. Elementos que constituyen a un robot . . . . .                    | 5          |
| 1.3. Clasificación de manipuladores robóticos . . . . .                | 9          |
| 1.4. Componentes finales de un manipulador . . . . .                   | 12         |
| 1.5. Resumen . . . . .                                                 | 12         |
| 1.6. Ejercicios . . . . .                                              | 14         |
| <b>Capítulo 2 Operadores cinemáticos</b>                               | <b>17</b>  |
| 2.1. Introducción . . . . .                                            | 18         |
| 2.2. Conceptos cinemáticos básicos . . . . .                           | 19         |
| 2.3. Matrices de rotación . . . . .                                    | 20         |
| 2.3.1. Matrices de rotación básicas . . . . .                          | 28         |
| 2.3.2. Transformaciones de similaridad . . . . .                       | 30         |
| 2.3.3. Composición de rotaciones . . . . .                             | 31         |
| 2.3.4. Rotaciones con respecto a ejes absolutos . . . . .              | 32         |
| 2.4. Parametrización de matrices de rotación . . . . .                 | 34         |
| 2.4.1. Representación Roll-Pitch-Yaw (RPY) . . . . .                   | 35         |
| 2.4.2. Ángulos de Euler Z-Y-Z . . . . .                                | 37         |
| 2.4.3. Representación eje-ángulo (eje arbitrario) . . . . .            | 39         |
| 2.4.4. Cuaterniones . . . . .                                          | 41         |
| 2.5. Rotaciones empleando cuaterniones . . . . .                       | 46         |
| 2.5.1. Uso de MATLAB con matrices de rotación y cuaterniones . . . . . | 56         |
| 2.6. Transformaciones homogéneas . . . . .                             | 61         |
| 2.6.1. Operaciones de traslación sin rotación . . . . .                | 61         |

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.2. Operaciones de traslación con rotación . . . . .                       | 63         |
| 2.7. Interpretaciones de las transformaciones homogéneas . . . . .            | 64         |
| 2.8. Composición de matrices de transformación homogénea . . . . .            | 67         |
| 2.8.1. Inversa de una transformación homogénea . . . . .                      | 69         |
| 2.9. Aplicaciones adicionales de operaciones de rotación y traslación . . . . | 72         |
| 2.10. Resumen . . . . .                                                       | 84         |
| 2.11. Ejercicios . . . . .                                                    | 85         |
| <b>Capítulo 3 Cinemática directa</b>                                          | <b>89</b>  |
| 3.1. Introducción . . . . .                                                   | 90         |
| 3.2. Convención Denavit-Hartenberg . . . . .                                  | 90         |
| 3.2.1. Asignación de sistemas de coordenadas a los eslabones . . . . .        | 94         |
| 3.3. Obtención de parámetros DH para robots manipuladores . . . . .           | 96         |
| 3.4. Cálculo de las matrices de transformación homogénea . . . . .            | 103        |
| 3.5. Problemas adicionales . . . . .                                          | 112        |
| 3.6. Resumen . . . . .                                                        | 122        |
| 3.7. Ejercicios . . . . .                                                     | 122        |
| <b>Capítulo 4 Jacobiano del manipulador</b>                                   | <b>127</b> |
| 4.1. Introducción . . . . .                                                   | 128        |
| 4.2. Matrices Antisimétricas . . . . .                                        | 129        |
| 4.2.1. Propiedades de las matrices antisimétricas . . . . .                   | 131        |
| 4.3. Derivada de una matriz de rotación . . . . .                             | 132        |
| 4.4. Teorema de Euler . . . . .                                               | 134        |
| 4.4.1. Teorema de Euler: punto de vista geométrico . . . . .                  | 135        |
| 4.4.2. Teorema de Euler: punto de vista matemático . . . . .                  | 139        |
| 4.5. Cálculo de velocidad lineal y angular total . . . . .                    | 142        |
| 4.5.1. Velocidad lineal con orientación constante . . . . .                   | 142        |
| 4.5.2. Velocidad lineal inducida por rotaciones . . . . .                     | 143        |
| 4.5.3. Velocidad lineal total . . . . .                                       | 145        |
| 4.5.4. Velocidad angular total . . . . .                                      | 146        |
| 4.6. Velocidad lineal y angular en robots manipuladores . . . . .             | 147        |
| 4.7. Jacobiano del manipulador . . . . .                                      | 156        |
| 4.7.1. Cambio de sistema de referencia del Jacobiano . . . . .                | 159        |
| 4.7.2. Singularidades del manipulador . . . . .                               | 162        |
| 4.8. Método directo para calcular el Jacobiano . . . . .                      | 174        |

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 4.8.1. Jacobiano en el efector final . . . . .               | 183        |
| 4.8.2. Aplicaciones adicionales del Jacobiano . . . . .      | 187        |
| 4.9. Control de seguimiento de trayectorias . . . . .        | 193        |
| 4.10. Ejemplos . . . . .                                     | 203        |
| 4.11. Conclusión . . . . .                                   | 216        |
| 4.12. Ejercicios . . . . .                                   | 217        |
| <b>Capítulo 5 Dinámica del manipulador</b>                   | <b>223</b> |
| 5.1. Introducción . . . . .                                  | 224        |
| 5.2. Distribución de masa . . . . .                          | 225        |
| 5.3. Ecuaciones de Newton y Euler . . . . .                  | 250        |
| 5.3.1. Aceleraciones lineal y angular . . . . .              | 251        |
| 5.3.2. Cálculo de fuerzas y pares: enfoque externo . . . . . | 253        |
| 5.3.3. Cálculo de fuerzas y pares: enfoque interno . . . . . | 254        |
| 5.3.4. Resumen del cálculo de fuerzas y pares . . . . .      | 255        |
| 5.4. Ecuaciones dinámicas de Euler-Lagrange . . . . .        | 272        |
| 5.4.1. Restricciones y coordenadas generalizadas . . . . .   | 273        |
| 5.4.2. Principio del trabajo virtual . . . . .               | 276        |
| 5.4.3. Principio de D'Alembert . . . . .                     | 278        |
| 5.4.4. Ecuaciones de Euler-Lagrange . . . . .                | 280        |
| 5.4.5. Ecuaciones EL en robots manipuladores . . . . .       | 288        |
| 5.5. Aplicaciones Adicionales de las ecuaciones EL . . . . . | 320        |
| 5.5.1. Robot de articulaciones flexibles . . . . .           | 320        |
| 5.5.2. Circuitos eléctricos . . . . .                        | 330        |
| 5.6. Conclusión . . . . .                                    | 335        |
| 5.7. Ejercicios . . . . .                                    | 336        |
| <b>Apéndice A. Álgebra lineal y aplicaciones</b>             | <b>339</b> |
| <b>Apéndice B. Cinemática Inversa</b>                        | <b>347</b> |
| <b>Bibliografía</b>                                          | <b>363</b> |
| <b>Índice analítico</b>                                      | <b>365</b> |