

Contenido

| | |
|--|----|
| Parte I. Introducción | 1 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.1 Objetivos..... | 3 |
| 1.2 Motivación | 4 |
| 1.3 Contribuciones de la tesis..... | 8 |
| 1.4 Organización de la tesis | 8 |
| Parte II. Estado del Arte | 11 |
| 2 SISTEMAS EMPOTRADOS DE CONTROL..... | 13 |
| 2.1 Motivación y objetivos del capítulo..... | 13 |
| 2.2 Sistemas empotrados de control. Introducción | 13 |
| 2.3 Características de los sistemas empotrados de control..... | 15 |
| 2.4 Sistemas ciber-físicos | 18 |
| 2.5 Sistemas empotrados y sensores/actuadores inteligentes..... | 20 |
| 2.5.1 Redes inalámbricas de sensores (WSN) y Redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN) | 21 |
| 2.5.2 Sistemas de inteligencia ambiental..... | 22 |
| 2.6 Núcleo de control..... | 23 |
| 2.7 Resumen y conclusiones..... | 24 |
| 3 SISTEMA DISTRIBUIDO DE CONTROL | 27 |
| 3.1 Motivación y objetivos del capítulo..... | 27 |
| 3.2 Sistemas distribuidos de control. Introducción..... | 27 |
| 3.3 Control empotrado distribuido | 33 |
| 3.4 Control inteligente distribuido | 34 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.4.1 | Control inteligente distribuido basado en agentes | 34 |
| 3.4.2 | Características de tiempo real de los procesos continuos..... | 35 |
| 3.4.3 | Representación del conocimiento en los sistemas de control inteligente distribuido..... | 35 |
| 3.5 | Comunicaciones en el sistema distribuido de control | 36 |
| 3.6 | Middleware de control | 37 |
| 3.6.1 | Principales middlewares dedicados al control | 40 |
| 3.6.2 | Requisitos a cumplir en el middleware de control. Consideraciones de la arquitectura..... | 42 |
| 3.7 | Resumen y conclusiones del capítulo | 43 |
| Parte III. Propuesta de Diseño de Reguladores Modulares en un Entorno Distribuido | | |
| | | 45 |
| 4 | NÚCLEO DE CONTROL DISTRIBUIDO | 47 |
| 4.1 | Motivación y objetivos del capítulo..... | 47 |
| 4.2 | Núcleo de control..... | 48 |
| 4.2.1 | Definición y principales características del núcleo de control | 48 |
| 4.2.2 | Elementos y arquitectura del núcleo de control..... | 49 |
| 4.2.3 | Middleware del núcleo de control..... | 50 |
| 4.3 | Núcleo de control distribuido | 53 |
| 4.3.1 | Middleware completo del núcleo de control | 54 |
| 4.3.2 | Middleware reducido del núcleo de control..... | 57 |
| 4.3.3 | Estructura del núcleo de control distribuido | 59 |
| 4.4 | Escenario del problema | 62 |
| 4.4.1 | Parámetros del modelo..... | 62 |
| 4.4.2 | Características de las comunicaciones | 65 |
| 4.5 | Estrategia de control utilizando el núcleo de control distribuido..... | 68 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.5.1 | Tratamiento de distintos periodos entre los nodos..... | 68 |
| 4.5.2 | Sincronización de los nodos del sistema distribuido | 76 |
| 4.5.3 | Estructura de control del nodo supervisor | 76 |
| 4.5.4 | Estructura de control del nodo local | 77 |
| 4.5.5 | Tratamiento de los errores de modelado y el ruido. Compensación de la acción de control | 82 |
| 4.5.6 | Modos de funcionamiento | 85 |
| 4.5.7 | Tratamiento de los retardos y desfases en la comunicación..... | 96 |
| 4.6 | Metodología de diseño para la elección de los parámetros de control en el sistema distribuido..... | 99 |
| 4.6.1 | Elección de los parámetros del control MBPC en el nodo supervisor | 100 |
| 4.6.2 | Elección de la constante K de compensación de la acción de control en el nodo local..... | 102 |
| 4.7 | Resumen y conclusiones del capítulo | 104 |
| 5 | PRUEBAS EN SIMULACIÓN..... | 107 |
| 5.1 | Métodos de estimación de la calidad de la respuesta de control | 107 |
| 5.1.1 | Parámetros descriptivos de la evolución temporal de la variable controlada | 107 |
| 5.1.2 | Medidas de la desviación de la variable controlada respecto de la referencia | 108 |
| 5.1.3 | Método propuesto para estimar la calidad de la respuesta de control | 110 |
| 5.2 | Ejemplos de implementación | 112 |
| 5.2.1 | Pruebas realizadas en el proceso de segundo orden | 113 |
| 5.2.2 | Comparación de las distintas pruebas para los procesos en estudio.... | 129 |
| 5.3 | Influencia de las condiciones del entorno en el funcionamiento del sistema distribuido de control..... | 133 |
| 5.3.1 | Discrepancia del modelo respecto al proceso real | 133 |
| 5.3.2 | Ancho de banda consumido..... | 137 |

| | | |
|---|---|------------|
| 5.3.3 | Tiempo de cómputo del controlador | 145 |
| 5.3.4 | Perturbaciones a la salida del sistema..... | 150 |
| 5.4 | Resumen y conclusiones del capítulo | 155 |
| 6 | APLICACIONES..... | 157 |
| 6.1 | Introducción..... | 157 |
| 6.2 | Aplicación de la conmutación de controladores en un sistema robótico .. | 157 |
| 6.3 | Sistema distribuido de control utilizando el núcleo de control y los distintos modos de funcionamiento..... | 160 |
| 6.3.1 | Proceso de segundo orden subamortiguado | 160 |
| 6.3.2 | Control de posición de un motor de corriente continua | 172 |
| 6.4 | Resumen y conclusiones del capítulo | 182 |
| Parte IV. Conclusiones | | 183 |
| 7 | CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO | 185 |
| 7.1 | Conclusiones | 185 |
| 7.2 | Trabajo futuro | 186 |
| Parte V. Bibliografía | | 189 |
| Bibliografía..... | | 191 |
| Parte VI. Anexos..... | | 199 |
| Anexo A. Herramienta de cálculo y simulación del sistema distribuido de control | | 201 |
| A.1 | Características de la herramienta | 202 |
| A.1.1 | Programa principal | 203 |
| A.1.2 | Cálculo del control predictivo | 204 |
| A.1.3 | Simulación..... | 204 |
| A.2 | Modelo en simulación | 204 |
| A.2.1 | Sistema distribuido con nodos fuertemente interconectados | 205 |

| | | |
|----------|--|-----|
| A.2.2 | Sistema distribuido con canal de comunicaciones compartido..... | 206 |
| A.3 | Limitaciones de la herramienta de simulación..... | 208 |
| Anexo B. | Pruebas realizadas con el simulador..... | 209 |
| B.1 | Proceso de primer orden | 209 |
| B.1.1 | Elección de los parámetros del sistema distribuido de control | 209 |
| B.1.2 | Comportamiento del sistema distribuido de control | 215 |
| B.2 | Proceso de fase no mínima | 221 |
| B.2.1 | Elección de los parámetros del sistema distribuido de control | 221 |
| B.2.2 | Comportamiento del sistema distribuido de control | 226 |
| B.3 | Proceso con retardo múltiplo del periodo de muestreo..... | 233 |
| B.3.1 | Elección de los parámetros del sistema distribuido de control | 233 |
| B.3.2 | Comportamiento del sistema distribuido de control | 238 |
| B.4 | Proceso con efecto integral | 244 |
| B.4.1 | Elección de los parámetros del sistema distribuido de control | 245 |
| B.4.2 | Comportamiento del sistema distribuido de control | 249 |
| Anexo C. | Utilización de controladores predictivos en el nodo supervisor | 257 |
| C.1 | Introducción..... | 257 |
| C.2 | Características del control predictivo basado en modelo | 258 |
| C.3 | Estrategia del MBPC | 259 |
| C.4 | Controladores predictivos GPC y CRHPC | 261 |
| C.5 | Controladores predictivos con restricciones | 267 |
| Anexo D. | Método de interpolación basado en spline cúbica natural | 271 |