

Contenidos

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Lógica difusa | 5 |
| 2.1. Conceptos introductorios | 6 |
| 2.1.1. Conjuntos clásicos | 6 |
| 2.1.2. Variables lingüísticas | 7 |
| 2.2. Conjuntos difusos | 8 |
| 2.3. Funciones de membresía | 10 |
| 2.4. Definiciones difusas adicionales | 12 |
| 2.5. Operaciones difusas | 14 |
| 2.5.1. Propiedades | 15 |
| 2.6. Relaciones | 17 |
| 2.6.1. Relaciones difusas | 17 |
| 2.6.2. Composición | 18 |
| 2.6.3. El problema inverso | 21 |
| 3. Controladores lingüísticos difusos | 23 |
| 3.1. El problema del control | 23 |
| 3.1.1. Esquemas a lazo abierto | 25 |
| 3.1.2. Esquemas a lazo cerrado | 25 |
| 3.1.3. Control por variables de estado | 26 |
| 3.1.4. Estabilidad | 27 |
| 3.1.5. Controladores digitales | 27 |
| 3.2. El controlador difuso | 29 |
| 3.2.1. Estructura interna | 31 |
| 3.2.2. Interfaz real-difuso | 32 |
| 3.2.3. Reglas lingüísticas | 33 |
| 3.2.4. Mecanismo de inferencia | 35 |
| 3.2.5. Interfaz difuso-real | 42 |
| 4. Diseño de un controlador lingüístico | 44 |
| 4.1. El software MELON | 45 |
| 4.2. Cinética puntual | 46 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.1. | Controlador lingüístico difuso | 47 |
| 4.2.2. | Descripciones lingüísticas | 47 |
| 4.2.3. | Reglas lingüísticas | 48 |
| 4.2.4. | Conjuntos difusos asociados | 49 |
| 4.2.5. | Implementación y resultados | 50 |
| 4.2.6. | Análisis de los resultados | 51 |
| 4.3. | Tanque mezclador | 53 |
| 4.3.1. | Variables lingüísticas | 55 |
| 4.3.2. | Control independiente | 56 |
| 4.3.3. | Control combinado | 56 |
| 4.3.4. | Resultados | 56 |
| 4.3.5. | Control por variables de estado | 58 |
| 4.4. | La rueda loca de Lorenz | 61 |
| 4.4.1. | Las reglas del juego | 62 |
| 4.4.2. | Comportamiento sin control | 63 |
| 4.4.3. | Control difuso lingüístico | 64 |
| 5. | El loop de Welander | 66 |
| 5.1. | Loops de convección natural | 67 |
| 5.1.1. | La aproximación de Boussinesq | 67 |
| 5.1.2. | Balance de momento | 69 |
| 5.1.3. | Balance de energía | 71 |
| 5.1.4. | El término de fuente | 73 |
| 5.2. | El problema de Welander | 74 |
| 5.3. | Análisis matemático | 75 |
| 5.3.1. | Ecuaciones de balance | 75 |
| 5.3.2. | Adimensionalización | 77 |
| 5.3.3. | Estado estacionario | 79 |
| 5.3.4. | Estabilidad | 80 |
| 5.3.5. | Explicación física de la inestabilidad | 81 |
| 5.4. | Solución numérica | 81 |
| 5.4.1. | Esquema en diferencias finitas | 82 |
| 5.5. | Control difuso lingüístico | 83 |
| 5.5.1. | El sistema a controlar | 83 |
| 5.5.2. | Estabilización del estado estacionario | 83 |
| 5.5.3. | El controlador C1 | 85 |
| 5.5.4. | El controlador C2 | 88 |
| 5.5.5. | El controlador C3 | 88 |
| 6. | Controladores difusos de Takagi-Sugeno | 93 |
| 6.1. | Sistemas difusos funcionales | 93 |
| 6.2. | Sistemas difusos de Takagi-Sugeno | 94 |
| 6.3. | Sistemas dinámicos de Takagi-Sugeno | 95 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.3.1. | Sistemas discretos | 98 |
| 6.4. | Compensación distribuida en paralelo | 99 |
| 6.4.1. | Estabilidad | 99 |
| 6.4.2. | Diseño de un controlador difuso de T-S | 102 |
| 7. | El lazo toroidal | 105 |
| 7.1. | Descripción | 105 |
| 7.2. | Análisis matemático | 106 |
| 7.2.1. | Adimensionalización | 107 |
| 7.2.2. | Estado estacionario | 109 |
| 7.2.3. | Análisis de Fourier | 110 |
| 7.2.4. | Puntos fijos y estabilidad | 113 |
| 7.3. | Diseño de un controlador difuso | 117 |
| 7.3.1. | Perturbación del punto fijo | 118 |
| 7.3.2. | Modelo difuso de T-S | 120 |
| 7.3.3. | Diseño del controlador | 120 |
| 8. | Loop experimental | 127 |
| 8.1. | Instrumentación | 127 |
| 8.1.1. | Adquisición | 128 |
| 8.2. | El loop rectangular | 129 |
| 8.3. | Resultados | 132 |
| 8.3.1. | Caudal | 132 |
| 8.3.2. | Temperatura con dos calefactores | 133 |
| 8.3.3. | Temperatura con cuatro calefactores | 135 |
| 8.4. | Análisis | 136 |
| 9. | Conclusiones | 138 |
| 9.1. | Trabajos futuros | 139 |
| A. | Evaluación económica | 141 |
| A.1. | Distribución temporal de las tareas | 141 |
| A.2. | Estimación de costos | 142 |
| B. | Documentación del software MELON | 145 |
| B.1. | Quick-start: controlador difuso proporcional | 146 |
| B.2. | Opciones de la línea de comandos | 146 |
| B.3. | Sintaxis del código fuzzy | 147 |
| B.3.1. | Definiciones generales | 148 |
| B.3.2. | Selección de operadores | 148 |
| B.3.3. | Definición de variables lingüísticas | 148 |
| B.3.4. | Definición de límites | 149 |
| B.3.5. | Definición de vectores lingüísticos | 150 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| B.3.6. | Definición de matrices | 150 |
| B.3.7. | Definición de valores lingüísticos | 150 |
| B.3.8. | Reglas difusas | 151 |
| C. | Códigos fuzzy | 152 |
| C.1. | Capítulo 4 | 152 |
| C.1.1. | Cinética puntual | 152 |
| C.1.2. | Tanque mezclador combinado | 152 |
| C.1.3. | Rueda loca | 153 |
| C.2. | Capítulo 5 | 154 |
| C.2.1. | Controlador C3 | 154 |
| C.3. | Capítulo 6 | 155 |
| C.3.1. | Sistema de Lorenz | 155 |
| C.4. | Capítulo 7 | 156 |
| C.4.1. | Estabilizador del punto fijo de interés | 156 |
| Referencias | | 157 |