

Índice general

1. Modelado de sistemas para su control	1
1.1. Introducción	1
1.2. Conceptos básicos	1
1.2.1. Sistema	1
1.2.2. Control de procesos	2
1.2.3. Control digital	3
1.2.4. Modelo matemático	4
1.3. Descripción externa	5
1.4. Descripción interna	7
1.5. Equivalencia entre las descripciones interna y externa	9
1.5.1. Sistemas SISO	10
1.5.2. Sistemas SIMO, MISO y MIMO	14
1.6. Soluciones de las ecuaciones de estado y de salida	15
1.6.1. Soluciones de tiempo discreto	15
1.6.2. Soluciones de tiempo continuo	17
1.6.3. Discretización de ecuaciones de tiempo continuo	19
1.7. Retardos de transporte	20
1.8. Ejercicios	24
1.8.1. Simulación de sistemas lineales	24
1.8.2. Formas canónicas de representación interna	25
1.8.3. Representación del retardo de transporte	27
1.9. Referencias	30
2. Identificación de procesos lineales	31
2.1. Introducción	31
2.2. Identificación gráfica de parámetros	32
2.3. Identificación por correlación cruzada	33
2.4. Estimación de mínimos cuadrados de los errores	36
2.5. Estimación recurrente de mínimos cuadrados	40
2.6. Paso a funciones de transferencia de tiempo continuo	43
2.7. Ejercicios	44
2.7.1. Identificación gráfica de parámetros	44
2.7.2. Identificación por correlación cruzada	45
2.7.3. Identificación recurrente de mínimos cuadrados	47
2.8. Referencias	50
3. Análisis de la representación interna de sistemas lineales	51
3.1. Introducción	51
3.2. Controlabilidad	51
3.2.1. Controlabilidad de salida	55
3.3. Observabilidad	56
3.4. Relaciones entre controlabilidad y observabilidad	58

3.5.	Estabilidad de sistemas lineales cerrados	61
3.6.	El conjunto de estados recuperables	63
3.7.	Ejercicios	65
3.7.1.	Controlabilidad y observabilidad	65
3.7.2.	Variables de estado redundantes	68
3.7.3.	Estabilidad de sistemas cerrados	70
3.7.4.	Conjunto de estados recuperables	72
3.8.	Referencias	74
4.	Realimentación lineal del vector de estado	75
4.1.	Introducción	75
4.2.	Asignación de polos	75
4.2.1.	Sistemas de una sólo actuación	77
4.2.2.	División en subsistemas de una sólo actuación	80
4.2.3.	Forma diádica	83
4.3.	Regulación de consignas	84
4.3.1.	Variables de integración	86
4.4.	Observación del vector de estado	88
4.4.1.	Observador reducido	89
4.4.2.	Estimador de estado actual	91
4.5.	Principio de separación	92
4.6.	Seguimiento de trayectorias	93
4.6.1.	Generación de trayectorias	95
4.7.	Ejercicios	95
4.7.1.	Realimentación lineal del vector de estado	95
4.7.2.	Múltiples entradas de control	97
4.7.3.	Observador reducido	99
4.7.4.	Principio de separación en sistemas deterministas	100
4.7.5.	Seguimiento de trayectorias discontinuas	102
4.7.6.	Seguimiento de trayectorias continuas	105
4.8.	Referencias	107
5.	Análisis de sistemas no lineales	109
5.1.	Introducción	109
5.2.	Algunos comportamientos no lineales	110
5.2.1.	Variación ante la escala	110
5.2.2.	Escape en tiempo finito	110
5.2.3.	Ciclos límite	112
5.2.4.	Puntos de equilibrio aislados	112
5.2.5.	Bifurcaciones	113
5.2.6.	Caos	113
5.2.7.	Dependencia entre frecuencia y amplitud	114
5.3.	Representación en el plano de estados	114
5.3.1.	Puntos de equilibrio	115
5.3.2.	Simetrías del retrato de estados	116
5.3.3.	Sistemas de primer orden	117
5.3.4.	Método analítico	117
5.3.5.	Método de las isoclinas	118
5.4.	Análisis en el plano de estados	119
5.4.1.	Duración de tramos de trayectorias	119

5.4.2.	Comportamiento de sistemas autónomos lineales cerrados	120
5.4.3.	Trayectorias cerradas	123
5.4.4.	Ciclos límite	125
5.5.	Análisis mediante la función descriptiva	125
5.5.1.	Estabilidad de los ciclos límite	128
5.6.	Ejercicios	130
5.6.1.	Atractores extraños	130
5.6.2.	Valores críticos	131
5.6.3.	Análisis en el plano de estados	135
5.6.4.	Análisis mediante la función descriptiva	136
5.6.5.	Evaluación numérica de la función descriptiva	139
5.7.	Referencias	143
6.	Estabilidad de procesos no lineales	145
6.1.	Introducción	145
6.2.	Estabilidad de entrada/salida	145
6.2.1.	El teorema de la ganancia pequeña	146
6.2.2.	El criterio del círculo	147
6.3.	Estabilidad en el espacio de estados	149
6.4.	Método directo de Lyapunov	150
6.4.1.	Dominio de atracción	153
6.4.2.	Lema de Barbalat	154
6.4.3.	Teorema de La Salle	154
6.5.	Método de linealización de Lyapunov	155
6.6.	Método de Krasovskii	159
6.7.	Técnica del gradiente variable	162
6.8.	Perturbaciones singulares	164
6.9.	Ejercicios	167
6.9.1.	Criterio del círculo	167
6.9.2.	Estabilidad de sistemas de primer orden	168
6.9.3.	Función de Lyapunov de sistemas no lineales	170
6.9.4.	Estabilidad de sistemas abiertos	171
6.9.5.	Inestabilidad	173
6.9.6.	Perturbaciones extrañas	175
6.10.	Referencias	178
7.	Técnicas de control no lineal	179
7.1.	Introducción	179
7.2.	Control de estructura variable	179
7.3.	Linealización de pequeñas perturbaciones	182
7.3.1.	Observadores no lineales	183
7.3.2.	Linealización extendida	185
7.4.	Linealización por realimentación	187
7.4.1.	Transformación de la entrada de control	187
7.4.2.	Transformaciones de entradas y estados	189
7.4.3.	Condiciones para la linealización por realimentación	190
7.5.	Control deslizante	193
7.6.	Control adaptativo	199
7.6.1.	Control adaptativo autoajustable	200
7.6.2.	Control adaptativo por modelo de referencia	200

7.7. Control borroso	202
7.8. Ejercicios	205
7.8.1. Controlador todo-nada	205
7.8.2. Observador no lineal	206
7.8.3. Transformación de las actuaciones	209
7.8.4. Transformación de entrada y estados	212
7.8.5. Condiciones para la linealización por realimentación	213
7.8.6. Planificación de ganancias	215
7.8.7. Interacción magnética entre cables eléctricos	218
7.8.8. Control con incertidumbre	221
7.8.9. Controlador borroso	225
7.9. Referencias	226
8. Técnicas de optimización	229
8.1. Introducción	229
8.2. Multiplicadores de Lagrange	230
8.3. Optimización basada en el gradiente	231
8.3.1. Selección del paso óptimo	232
8.4. El método Simplex	233
8.5. Programación dinámica	235
8.6. Cristalización simulada	236
8.7. Algoritmos genéticos	238
8.7.1. Mecanismos evolutivos de poblaciones artificiales	238
8.7.2. Implantación de un algoritmo genético	239
8.7.3. Optimización multiobjetivo	240
8.8. Identificación de procesos no lineales	241
8.8.1. Transformaciones hacia relaciones lineales	241
8.8.2. Estimación de parámetros mediante simulación	242
8.9. Ejercicios	242
8.9.1. Búsqueda del mínimo de una función	242
8.9.2. Transformaciones hacia relaciones lineales	245
8.9.3. Estimación de parámetros mediante simulación	247
8.10. Referencias	248
9. Control óptimo	249
9.1. Introducción	249
9.2. Control óptimo en un número finito de pasos	249
9.2.1. Control de mínimo número de pasos	249
9.2.2. Control de mínima actuación	250
9.3. Regulación lineal óptima cuadrática	251
9.3.1. Realimentación lineal óptima cuadrática de tiempo discreto	251
9.3.2. Realimentación lineal óptima cuadrática de tiempo continuo	254
9.4. Control óptimo en tiempo continuo con horizonte finito	258
9.4.1. La ecuación de Hamilton-Jacobi-Bellman	261
9.4.2. Efecto de entradas acotadas y discontinuas	263
9.5. Control predictivo	265
9.6. Ejercicios	268
9.6.1. Control en un número finito de pasos	268
9.6.2. Control óptimo de un cohete lunar	271
9.6.3. Control óptimo de un motor de corriente continua	275

9.6.4. Control predictivo	281
9.7. Referencias	283
10. Filtro de Kalman	285
10.1. Introducción	285
10.2. Estimación del vector de estado	285
10.2.1. Hipótesis de partida	285
10.2.2. Filtro de Kalman de tiempo discreto	287
10.2.3. Filtro del Kalman de tiempo continuo	291
10.3. Principio de dualidad	293
10.4. Principio de separación en sistemas estocásticos	294
10.5. Filtro de Kalman generalizado	295
10.5.1. Identificación adaptativa de parámetros	296
10.6. Tratamiento de ruidos con correlación entre ellos	296
10.7. Tratamiento de ruidos coloreados	298
10.8. Ejercicios	300
10.8.1. Identificación adaptativa de parámetros	300
10.8.2. Ruidos coloreados	302
10.9. Referencias	304
A. Linealización armónica	305
A.1. Series de Fourier	305
A.2. Función descriptiva	307
A.3. Ejercicio	308
A.3.1. Relé con zona muerta	308
A.4. Referencias	309
B. Lógica borrosa	311
B.1. Conjuntos borrosos	311
B.2. Proceso de inferencia borroso	312
B.3. Ejercicio	313
B.3.1. Control de una ducha	313
B.4. Referencias	314
C. Generación de ruido blanco	315
C.1. Obtención de distribuciones uniformes	315
C.2. Paso de distribución uniforme a gaussiana	315
C.3. Comprobación de la bondad de generación de números aleatorios	317
C.4. Ejercicio	318
C.4.1. Generación de ruido blanco	318
C.5. Referencias	319