

Cursos obligatorios

II.1. Álgebra y ecuaciones diferenciales (60 horas; 10 créditos)

Parte I: Álgebra

1. Álgebra abstracta (16 horas).
Definición de grupo y de grupo abeliano. Ejemplos. Homomorfismos de grupos. Anillos, ideales y homomorfismos. Anillos de matrices. Dominios euclidianos, dominios de ideales principales y dominios de factorización única. Máximo común divisor (mcd) y mínimo común múltiplo (mcm). Teorema de Bézout. \mathbb{Z} y el anillo de polinomios sobre un campo en una variable como dominios euclidianos. Descomposición de una matriz cuadrada sobre un dominio de ideales principales (forma de Smith). Factores invariantes de una matriz.
2. Álgebra lineal (29 horas).
Espacio dual, aplicación dual. Espacio doble dual. Aniquilador. Transpuesta de una transformación lineal. Valores y vectores propios. Polinomios mínimo y característico de un operador lineal. Teorema de Cayley-Hamilton. Subespacios T-invariantes, operadores nilpotentes, subespacios cíclicos. Matriz compañera. Formas canónicas: Jordan, racional, racional primaria. Funciones de matrices. Exponencial de una matriz. Descomposición de Schur. Matrices unitarias. Formas cuadráticas y matrices hermitianas.

Parte II: Ecuaciones diferenciales

3. Definiciones básicas (7 horas).
Orden y grado. Linealidad y no-linealidad. Homogeneidad. Solución de una EDO. Condición de Lipschitz. Existencia y Unicidad local. Intervalo máximo de la solución. Existencia y Unicidad Global. Continuidad de las soluciones con respecto a las condiciones iniciales. Continuidad de las soluciones con respecto a parámetros.
4. Ecuaciones lineales de orden arbitrario (8 horas).
Caso homogéneo: Existen n soluciones linealmente independientes de una EDO de orden n . Matriz de transición de estados. Propiedades. Sistema adjunto y sus propiedades. Principio de superposición. *Caso no-homogéneo:* Fórmula de variación de parámetros. EDO's lineales con coeficientes constantes, polinomio característico, solución homogénea. Solución de EDO lineales con coeficientes constantes no-homogénea, Principio de superposición c/r a condiciones iniciales y c/r a entradas, pero no simultáneamente.

Bibliografía

- [1] Axler, Sheldon, *Linear Algebra Done Right*, Springer-Verlag, 1997
- [2] Gantmacher, Felix R., *The Theory of Matrices, 1 y 2*, Chelsea, 1998
- [3] Grossman, Stanley I., *Álgebra Lineal*, quinta edición, McGraw-Hill, 1996
- [4] Halmos, Paul R., *Finite-dimensional Vector Spaces*, Springer-Verlag, 1974
- [5] Herstein, Israel N., *Álgebra Abstracta*, Iberoamérica, 1988
- [6] Herstein, Israel N., *Álgebra Moderna*, Trillas, 1970
- [7] Hoffman, Kenneth & Kunze Ray, *Álgebra Lineal*, Prentice-Hall, 1973
- [8] Lipschutz, Seymour, *Álgebra Lineal*, Schaum-McGraw-Hill, 1971
- [9] Nering, Evar D., *Linear Algebra and Matrix Theory*, second edition, Wiley, 1970
- [10] Boyce, W. E y R. C. Di Prima. *Ecuaciones Diferenciales y Problemas con Valores en la frontera*, 4ta. Ed. Limusa-Wiley, 2003
- [11] Hurewicz, W. *Lectures on Ordinary Differential Equations*. MIT Press, 1958. Reprint: Dover, 1990

II.2. Introducción al control (60 horas; 10 créditos)

Objetivo: Proporcionar un panorama sobre algunos de los tópicos relevantes de la teoría de control mediante prácticas de laboratorio. Estos tópicos serán objeto de un estudio más detallados en cursos subsecuentes dentro del plan de estudios del programa de maestría.

Metodología

Cada práctica consta de dos partes. La primera corresponde a una introducción teórica para cada uno de los temas abordados; la segunda consiste en trabajo en laboratorio que soporte el material visto en la primera parte. Se utilizarán las cuatro plataformas de enseñanza con las que cuenta el Centro de Servicios Experimentales; cada una de ellas

consiste de un servomotor de corriente directa dotado de sensores de velocidad y de posición, de un amplificador de potencia de grado industrial, de un aislamiento galvánico, de una tarjeta de adquisición de datos y de una computadora personal. La programación se realiza mediante el programa MatLab/Simulink en conjunción con el programa de control en tiempo real Wincon.

Comentarios

Además de sensibilizar a los estudiantes a los tópicos tratados en el curso, el uso de las plataformas les permitirá adquirir experiencia en el control en tiempo real de prototipos de laboratorio.

Tópicos.

1. Modelado e identificación paramétrica. Servomecanismo de segundo orden y el programa MatLab para identificar sus parámetros. Referencias: [1], [2].
2. Control Proporcional (P), control Proporcional Derivativo (PD), control Proporcional Integral Derivativo (PID). Servomecanismo de segundo orden. Se aplica una sintonización heurística basada en la interpretación mecánica de las acciones proporcional y derivativa. Referencias: [1], [3].
3. Asignación de polos: Fórmula de Ackermann. Servomecanismo de segundo orden. Sintonización de un regulador PID. Referencias: [4].
4. Regulador Cuadrático Lineal. Servomecanismo de segundo orden. Sintonización de las ganancias de un controlador PD. Referencias: [4].
5. Control H_∞ . Servomecanismo de primer orden. Se contrasta esta filosofía de control con la correspondiente al Control Adaptable. Referencias: [5], [6].
6. Control Adaptable. Servomecanismo de primer orden. Se contrasta esta filosofía de control con la correspondiente al Control H_∞ . Referencias: [7], [8].
7. Discretización de controladores. Servomecanismo de segundo orden. Se comparan varios métodos de discretización del regulador PID entre los que se incluyen la transformación bilineal y la transformada en Z. Referencias: [9].
8. Observadores lineales. Servomecanismo de segundo orden. Se compara el desempeño de un controlador PD cuando se utilizan mediciones de velocidad y cuando éstas se obtienen a través de un observador de estados. [4].
9. Seguimiento de trayectorias: Prealimentación. Servomecanismo de segundo orden. Se considera el seguimiento de una trayectoria variante en el tiempo para la cual existan primera y segunda derivadas. Referencias: [10, 11].

Bibliografía

- [1] B. C. Kuo, *Automatic control systems*, 7th ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1995.
- [2] R. Isermann and M. Münchhof, *Identification of Dynamical Systems: An Introduction with Applications*: Springer Verlag, 2011
- [3] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID controllers*, 2nd ed. Research Triangle Park, N.C.: International Society for Measurement and Control, 1995.
- [4] G. C. Goodwin, S. F. Graebe, and M. E. Salgado, *Control system design* vol. 240: Prentice Hall New Jersey, 2001.
- [5] A. Francis, *A course in H [infinity] control theory*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1987
- [6] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essentials of robust control*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998.
- [7] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust adaptive control*. Upper Saddle River, NJ: PTR Prentice-Hall, 1996
- [8] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive control*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1989.
- [9] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Computer controlled systems : theory and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984.
- [10] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. New York: Wiley, 1989.
- [11] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modelling and control of robot manipulators*. London ; New York: Springer, 2000

II.3. Modelos matemáticos (60 horas; 10 créditos)

1. Introducción (4 horas).
¿Qué es un sistema? ¿Qué es un experimento? ¿Qué es un modelo? ¿Qué es la simulación? ¿Por qué es importante el modelado? ¿Por qué es importante la simulación? Los peligros de la simulación. Buenas

razones para utilizar la simulación. Los tipos de modelos matemáticos. Problemas directos contra problemas inversos. Software para simulación y modelado de sistemas físicos.

2. Principios básicos del modelado de circuitos eléctricos pasivos (6 horas).
Introducción. Elementos capacitivos, inductivos y disipativos. Ecuaciones de mallas. Ecuaciones de nodos. Desventajas de las ecuaciones de mallas y de las ecuaciones de nodos. Modelos en el espacio de estados. Bucles algebraicos. Singularidades estructurales. Desventajas de los modelos en el espacio de estados.
3. Principios básicos del modelado de sistemas mecánicos planos (6 horas).
Introducción. Elementos traslacionales: Masa, resorte amortiguador. Elementos rotacionales: Inercia, resorte torsional, amortiguador rotacional. La Ley de Newton para movimientos traslacionales y para movimientos rotacionales. El ejemplo de la grúa colgante. Modelado de poleas. El problema del péndulo invertido. Modelado de sistemas electromecánicos.
4. Modelado Euler-Lagrange de sistemas físicos (22 horas).
Introducción. Funciones de energía para los elementos capacitivos e inductivos. Funciones de energía para elementos mecánicos traslacionales. Funciones de energía para elementos mecánicos rotacionales. Fuerzas generalizadas. Grados de libertad y coordenadas generalizadas. Ecuación de Lagrange para sistemas mecánicos conservativos. Ecuaciones de mallas a partir de las funciones de energía. Ecuaciones de nodos a partir de las funciones de energía. Ecuaciones de Euler Lagrange para sistemas mecánicos y eléctricos conservativos. Función de disipación de Rayleigh. Tensor de inercia y sus propiedades. Ecuaciones dinámicas de Euler.
5. Modelado por medio de grafos de vínculos (bond graphs) (8 horas).
Introducción. Diagramas de bloques. Gráficos de flujos de señales. Vínculos de potencia. Grafos de vínculos para sistemas eléctricos. Grafos de vínculos para sistemas mecánicos. Generalizaciones a otros tipos de sistemas. Transductores de energía. El grafo de vínculos dual. Resumen.
6. Modelado de reactores biotecnológicos (8 horas).
Introducción y conceptos básicos. -Reactor de tanque agitado y flujo continuo (CSTR). Modelos para el crecimiento celular, modelo de Monod. Ecuaciones de balance de sustrato, células y producto: Caso estático. Ecuaciones de balance de sustrato, células y producto: Caso dinámico. Ejemplo: Fermentación anaerobia usando levadura.
7. Modelado de dinámicas de poblaciones (6 horas).
Introducción. Crecimiento, decaimiento y la ecuación logística. Modelo depredador-presa (Lotka-Volterra). Competencia y cooperación. Caos.

Bibliografía

- [1] Chen, C.T. *Linear System Theory and Design*. 3rd Ed. New York: Oxford University Press, 1999
- [2] Cellier, F. E., *Continuous System Modeling*. Springer-Verlag, New York, 1991.
- [3] Haberman, R., *Mathematical Models: Mechanical Vibrations, Population Dynamics and Traffic Flow*. Prentice Hall. Englewood Cliffs New Jersey, 1977.
- [4] Meisel, J., *Principles of Electromechanical-Energy Conversion*. McGraw-Hill, 1966.
- [5] Poznyak, A., *Modelado Matemático de los Sistemas Mecánicos, Eléctricos y Electromecánicos*. En preparación. Disponible en versión preliminar.

II.4. Sistemas lineales (60 horas; 10 créditos)

1. Descripción de sistemas lineales invariantes en el tiempo (12 horas).
 - 1.1. Descripción en el dominio del tiempo: Representación de estado. Matriz de transición de estados. Valores característicos de la matriz A .
 - 1.2. Descripción en el dominio de la frecuencia: Matriz de transferencia de sistemas. Forma racional. Matrices de transferencia y sus propiedades. Forma de Smith Mc-Millan. Polos y ceros de transmisión.
2. Controlabilidad, observabilidad y dualidad de sistemas invariantes en el tiempo (12 horas).
 - 2.1. Controlabilidad: Definición y criterios. Grammiano de controlabilidad. Rango de la matriz de controlabilidad de Kalman, prueba PBH.

- 2.2. Observabilidad: Definición y criterios. Grammiano de observabilidad. Dualidad. Descomposición canónica de Kalman
3. Teoría de realizaciones (6 horas).
 - 3.1. Problema de realización. Parámetros de Markov.
 - 3.2. Invariancia de los parámetros con respecto a cambio de coordenadas.
 - 3.3. Planteamiento general del problema de realización. Definición de realización y realización mínima de una función de transferencia.
 - 3.4. Construcción de una Realización. Realizaciones controlable, observable y diagonal (Jordan).
 - 3.5. Teorema de construcción de una realización mínima. Realización de una secuencia de parámetros de Markov.
4. Estabilidad (6 horas).
 - 4.1. Conceptos y teoremas básicos para sistemas lineales invariantes en el tiempo.
 - 4.2. Estabilidad asintótica y Estabilidad exponencial.
 - 4.3. Teorema de estabilidad de Lyapunov.
 - 4.4. Criterio de estabilidad de Lyapunov. Calculo de cotas exponenciales.
 - 4.5. Criterios básicos en el dominio de la frecuencia.
 - 4.6. Polinomios de Hurwitz. Curva de Mikhailov, Teorema de Hermite-Biehler. El método de D-particiones.
 - 4.7. Matriz de transferencia: criterio de estabilidad..
5. Estabilización (16 horas)
 - 5.1. Estabilización por retroalimentación estática de estado: sistemas estabilizables y asignación de polos.
 - 5.2. Estabilización por retroalimentación estática de salida.
 - 5.3. Estabilización por retroalimentación dinámica. Estabilización por medio de estimación del estado: observadores de Luenberger.
 - 5.4. Asignación de modos. Diseño de compensadores y observadores mediante enfoque de desigualdades Lineales matriciales.
 - 5.5. Diseño de compensadores en el dominio de la frecuencia (caso monovariable): el anillo de polinomios, coprimicidad, algoritmo de división, ecuación diofantina, parametrización de Youla, compensadores estrictamente propios.
 - 5.6. Discussion del caso multivariable).
6. Sistemas discretos: (4 horas)
 - 6.1. Alcanzabilidad: Alcanzabilidad implica controlabilidad pero no el inverso.
 - 6.2. Ecuación de Lyapunov discreta, Schur estabilidad
7. Sistemas variantes en el tiempo: (4 horas)
 - 7.1. Expresión de la solución, criterio de estabilidad, sistemas con coeficientes periódicos (Teorema de Floquet)

Bibliografía

- [1] Chen, C.T. *Linear System Theory and Design*. 3rd Ed. New York: Oxford University Press, 1999
- [2] Kailath, T. *Linear Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980
- [3] Rugh, J. W. *Linear System Theory*. 2nd Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996
- [4] Polderman, J.C y Willems, J.C. *Introduction to Mathematical Systems Theory. A Behavioral Approach*. New York: Springer Verlag, 1997

II.5. Control óptimo (60 horas; 10 créditos)

1. Diseño de Control Óptimo para ejemplos reales
2. Formulación general del problema y algunos ejemplos básicos.
3. Optimización finita dimensional:
 - 3.1. Problemas sin restricciones
 - 3.2. Método de los Multiplicadores de Lagrange
 - 3.3. Introducción al análisis de variaciones
4. Condición necesaria de Pontryagin para variaciones débiles.
5. Variaciones fuertes y la forma fuerte del Principio del Máximo de Pontryagin.
6. Condiciones suficientes de optimalidad
7. Control Óptimo con restricciones y problemas de tiempo óptimo
8. Programación dinámica y la ecuación de Hamilton-Jacobi-Bellman
9. Técnicas, verificación y procedimientos para solución de la ecuación de HJB
10. Relación entre el Principio del Máximo y la Programación Dinámica

11. Problemas de Control Lineal Cuadrático Óptimo.
12. Introducción a los juegos diferenciales LQ
13. Ejemplos de problemas de control en tiempo discreto y control estocástico óptimo

Bibliografía

- [1] L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanski, R.V. Gamkrelidze and E.F. Mischenko, *The mathematical Theory of Optimal Processes*, Wiley, New York, 1962.
- [2] L. Berkovitz, *Optimal Control Theory*, Springer, New York, 1974.
- [3] R. Bellman, *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, 1957.
- [4] H.O. Fattorini, *Infinite-Dimensional Optimization and Control Theory*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [5] A.E. Bryson and Y.C. Ho, *Applied Optimal Control*, Hemisphere, Washington DC, 1975.
- [6] J. Betts, *Practical Methods for Optimal Control Problems Using Nonlinear Programming*, SIAM, Philadelphia, 2001
- [7] V.M. Alekseev, V.M. Tichomirov, S.V. Fomin, *Optimal Control*, Plenum Publishing Co, New York, 1987
- [8] J.L. Speyer and D.H. Jacobson, *Primer on Optimal Control Theory*, SIAM, Philadelphia, 2010
- [9] V.G. Boltyanski and A.S. Poznyak, *The Robust Maximum Principle*, Birkhaeuser, London, 2012
- [10] D.E. Kirk, *Optimal Control Theory*, Dover, New York, 1998
- [11] J. Jahn, *Introduction to the Theory of Nonlinear Optimization*, Springer, Berlin, 2007
- [12] B.T. Polyak, *Introduction to Optimization*, Optimization Software, New York, 1987

II.6. Introducción a la robótica (60 horas; 10 créditos)

Objetivo: Dar una introducción a la Robótica desde la perspectiva del modelado y control de sistemas dinámicos.

Descripción: El curso está compuesto de tres partes. En la primera se aborda la temática de los robots manipuladores incluyendo su modelado cinemático y dinámico, así como los aspectos esenciales de control a nivel articular. La segunda parte expone los aspectos básicos de modelado y control cinemático de robots móviles. La tercera parte expone la introducción a algunas temáticas avanzadas de control de robots

1. Preliminares
2. Primera parte: Robots Manipuladores
 - 2.1. Modelos cinemáticos directo e inverso.
 - 2.2. Matriz Jacobiana analítica y geométrica.
 - 2.3. Modelo dinámico: Formulación de Lagrange.
 - 2.4. Control descentralizado en el dominio de la frecuencia
 - 2.5. Control Proporcional Derivativo con compensación de gravedad: Análisis de estabilidad utilizando el método de Lyapunov
3. Segunda Parte: Robots Móviles.
 - 3.1. Modelo cinemático
 - 3.2. Problema de regulación y su análisis de estabilidad.
 - 3.3. Problema de seguimiento
 - 3.4. Problema de regulación y seguimiento
 - 3.5. Modelo dinámico
4. Tercera Parte: Tópicos avanzados
 - 4.1. Control Cartesiano de robots manipuladores
 - 4.2. Control en fuerza de robots manipuladores
 - 4.3. Introducción al control visual de robots
 - 4.4. Robots paralelos

Bibliografía

- [1] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, 2008.
- [2] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*. New York: Wiley, 1989.
- [3] D. M. Dawson, E. Zergeroglu, A. Behal, and W. E. Dixon, *Nonlinear control of wheeled mobile robots*: Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
- [4] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006.

- [5] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modelling and control of robot manipulators*. London ; New York: Springer, 2000.
- [6] C. A. Canudas de Wit, B. Siciliano, and G. Bastin, *Theory of robot control*. Berlin ; New York: Springer, 1996.
- [7] R. Kelly, V. Santibáñez, and A. Loria, *Control of robot manipulators in joint space*. London: Springer, 2005.

II.7. Sistemas No Lineales (60 horas; 10 créditos)

1. Introducción
 - 1.1. Motivación, ejemplos de sistemas no lineales
 - 1.2. Definición del problema de estabilización (por retro de estado, de salida, estática, dinámica)
2. Comportamiento cualitativo de sistemas no lineales
 - 2.1. Sistemas no lineales y puntos de equilibrio múltiples
 - 2.2. Conceptos básicos de estabilidad: estabilidad y estabilidad asintótica. Diferencia entre estabilidad y atractividad
3. Fundamentos de teoría de Lyapunov
 - 3.1. Método directo de Lyapunov
 - 3.1.1. Funciones definidas positivas y funciones de Lyapunov
 - 3.1.2. Conceptos refinados de estabilidad: estabildades global y exponencial
 - 3.1.3. Teoremas para puntos de equilibrio
 - 3.1.4. Teoremas sobre conjuntos invariantes (LaSalle)
 - 3.2. Método indirecto de Lyapunov
 - 3.2.1. Funciones de Lyapunov para sistemas lineales e invariantes en el tiempo
 - 3.2.2. Aproximación lineal de un sistema no lineal
 - 3.2.3. Teorema del método indirecto de Lyapunov
 - 3.2.4. Control lineal de sistemas no lineales (retro de estado y observación)
 - 3.3. Construcción de funciones de Lyapunov para sistemas no lineales
 - 3.3.1. Método de Krasovskii
 - 3.3.2. Método del gradiente variable
 - 3.3.3. Funciones de Lyapunov motivadas por propiedades físicas
4. Diseño de control basado en el método directo de Lyapunov
 - 4.1. Backstepping
 - 4.2. Control basado en pasividad
 - 4.3. Funciones de Lyapunov asignables. Fórmula universal de Sontag
5. Teoría de estabilidad avanzada
 - 5.1. Conceptos de estabilidad para sistemas no autónomos. Estabilidad uniforme
 - 5.2. Teoría de Lyapunov para sistemas no autónomos
 - 5.2.1. Método directo de Lyapunov para sistema no autónomos
 - 5.2.2. Método indirecto de Lyapunov (por aproximación lineal) para sistema no autónomos
 - 5.3. Existencia de funciones de Lyapunov
 - 5.4. Análisis Barbalat-Lyapunov
 - 5.4.1. Propiedades asintóticas de las funciones y sus derivadas
 - 5.4.2. Lema de Barbalat
 - 5.4.3. Sistema lineales positivos reales
 - 5.4.4. Lema de Kalman-Yakubovich
6. Funciones descriptivas
 - 6.1. No linealidades usuales en sistemas de control
 - 6.2. Funciones descriptivas de las no linealidades usuales
 - 6.3. Análisis de sistemas no lineales usando funciones descriptivas
7. Diseño de sistema de control no lineal
 - 7.1. Controlabilidad de sistema no lineales
 - 7.1.1. Alcanzabilidad y controlabilidad, alcanzabilidad y controlabilidad completas
 - 7.1.2. Descomposición de un sistema en subsistemas controlable y no controlable
 - 7.1.3. Criterios de controlabilidad: usando paréntesis de Lie (para sistemas sin deriva) y condición de Brockett
 - 7.2. Observabilidad de sistema no lineales

- 7.2.1. Distinguibilidad, observabilidad y distinguibilidad de estado final
- 7.2.2. Descomposición de un sistema en subsistemas observable y no observable
- 7.3. Linealización entrada–salida
 - 7.3.1. Grado relativo
 - 7.3.2. Dinámica interna, dinámica cero y sistemas de fase no mínima
- 7.4. Linealización entrada–estado
 - 7.4.1. Criterio de linealizabilidad usando paréntesis de Lie

Bibliografía

- [1] Aguilar-López, R., Mata-Machuca, J., Martínez-Guerra, R., *Observability and Observers for Nonlinear Dynamical Systems: Nonlinear Systems Analysis*, LAP LAMBERT, 2011
- [2] Brogliato, B., Lozano, R., Maschke, B., Egeland, O., *Dissipative Systems Analysis and Control: Theory and Applications*, 2da edición, Springer, 2006
- [3] Isidori, A., *Nonlinear Control Systems*, 3ra edición, Springer, 1995
- [4] Khalil, H., *Nonlinear Systems*, 3ra edición, Prentice Hall, 2002
- [5] Marino, R., Tomei, P., *Nonlinear Control Design*, Prentice Hall, 1995
- [6] Slotine, J.-J., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991
- [7] Sontag, E., *Mathematical Control Theory*, 2da edición, Springer, 1998

II.8. Control Robusto (60 horas; 10 créditos)

1 MATHEMATICALBACKGROUND

- 1.1 Quadratic Forms
- 1.1.1 Nonnegative definitematrices
- 1.1.2 Positive definiteness of a partitioned matrix: the Schur’s complement
- 1.1.3 Sylvester criterion
- 1.2 The Finsler’s lemma and procedure
- 1.2.1 The Finsler’s lemma
- 1.2.2 \square - procedure
- 1.3 Exercises
- 2 LINEAR MATRIX INEQUALITIES IN CONTROL
- 2.1 Main Definitions
- 2.2 LMI Feasibility and Parametrization of All Solutions
- 2.2.1 Feasibility
- 2.2.2 Parametrization of All Solutions
- 2.3 Nonlinear matrix inequalities equivalent to LMI
- 2.3.1 Matrix normconstraint
- 2.3.2 Nonlinear weighted norm constraint
- 2.3.3 Nonlinear trace norm constraint
- 2.3.4 Lyapunov inequality
- 2.3.5 Algebraic Riccati - Lurie’smatrix inequality
- 2.4 Some characteristics of linear stationary systems (LSS)
- 2.4.1 LSS and their transfer function
- 2.4.2 \square_2 norm.
- 2.4.3 Passivity and the positive-real lemma

iii

iv CONTENTS

- 2.4.4 Nonexpansivity and the bounded-real lemma
- 2.4.5 \square_∞ norm
- 2.4.6 \square -Entropy
- 2.4.7 Stability of stationary time-delay systems
- 2.4.8 Hybrid time-delay linear stability
- 2.5 Optimization problems with LMI constraints
- 2.5.1 Eigenvalue problem(EVP)

2.5.2	Tolerance level optimization
2.5.3	Maximization of the quadratic stability degree
2.5.4	Minimization of linear function $\text{Tr}(\cdot)$ under the Lyapunov-type constraint
2.5.5	The convex function $\log \det^{-1}(\cdot)$ minimization
2.6	Numerical methods for LMIs resolution
2.6.1	What does it mean "to solve LMI"?
2.6.2	Ellipsoid algorithm
2.6.3	Interior-point method
2.7	Appendix
2.7.1	Some simple properties of Linear Matrix Equations
2.7.2	Proofs of the main theorems on LMI's
2.8	Exercises
3	ATTRACTIVE ELLIPSOID METHOD
3.1	Complete Information Case: Classical Control Approaches
3.1.1	System description
3.1.2	Feasible and admissible control
3.1.3	Problem setting in the general Bolza form
3.1.4	Specific features of the classical optimal control
3.2	Incomplete Information Case
3.2.1	Robust tracking problem formulation
3.2.2	What is the effectiveness of the designed control in an incomplete information case?
3.3	Ellipsoid Based Feedback Control Design
3.4	Overview of the book
3.5	Subject area and the relationship to other books
4	ROBUST STATE FEEDBACK CONTROL
4.1	Introduction
4.2	Proportional feedback design
4.2.1	Model description
4.2.2	Problem formulation
4.3	\square -procedure based approach
4.4	Storage function method
4.5	Minimization of the attractive ellipsoid
4.6	Practical stabilization
4.7	Other restrictions on control and uncertainties
4.8	Illustrative Example
4.9	What to do if we don't know matrix \square ?
4.9.1	Description of the dynamic model in this case
4.9.2	Sufficient conditions of the attractiveness
4.9.3	Optimal robust linear feedback as a solution of an optimization problem with LMI's constraints
5	ROBUST OUTPUT FEEDBACK CONTROL
5.1	Static Feedback Control
5.1.1	System description and problem statement
5.1.2	Attractive Ellipsoids Method Application
5.1.3	Example: Stabilization of discontinuous system
5.2	Observer-based Feedback Design
5.2.1	State observer and the extended dynamic model
5.2.2	Stabilizing feedback gains $\square\square$ and $\square\square$
5.2.3	Numerical aspects
5.2.4	Example: Robust stabilization of the spacecraft
5.3	Dynamic Regulator
5.3.1	Full order linear dynamic controller
5.3.2	Main result on the attractive ellipsoid for a dynamic controller

5.3.3 Illustrative simulation	
6 ROBUST STABILIZATION OF TIME-DELAY SYSTEMS	113
6.1 Time-Delay Systems with Known Input Delay	
6.1.1 Brief historical remark	
6.1.2 System Description and Problem Statement	
6.1.3 Unavoidable Stabilization Error	
vi CONTENTS	
6.1.4 Minimal Invariant Ellipsoid for The Prediction System	
6.1.5 Minimal Attractive Ellipsoid of The Original System .	
6.1.6 Computational Aspects	
6.1.7 Numerical Example	
6.1.8 Conclusion	
6.2 Control of Systems with Unknown Input Delay	
6.2.1 Introduction	
6.2.2 ProblemStatement	
6.2.3 AEMfor Time Delay Systems	
6.2.4 Predictor-based output feedback design	
6.2.5 Adjustment of Control Parameters: Computational Aspects	
7 SLIDING MODE CONTROL	
7.1 Tracking as Stabilization	
7.2 ODE with Discontinuous Right-Hand Side	
7.2.1 Why ODE with DRHS are important in Control Theory	
7.2.2 ODE with DRHS and differential inclusions	
7.3 Slidingmode control	
7.3.1 Slidingmode surface	
7.3.2 Equivalent control method.	
7.4 SlidingMode Observers	
7.4.1 General observer for nonlinear systems	
7.4.2 Equivalent control method for the class of mechanical models	
7.5 Integral SlidingMode	
7.5.1 Main idea	
7.5.2 Problem Formulation in a general affine format	
7.5.3 Control Design Objective	
7.5.4 ISMControl Design	
7.6 Twist and Super-twist controllers	
7.6.1 Twist controller	
7.6.2 Super-Twist controller	
7.6.3 Super-Twist observer	
7.7 Adaptive SMC	
7.7.1 The σ -adaptationmethod 188	
7.7.2 The dynamic adaptation based on the Equivalent ControlMethod	
8 ABSOLUTE STABILITY AND H_∞ -ROBUST CONTROL	
8.1 Absolute Stability	
8.1.1 Linear systems with nonlinear feedbacks	
8.1.2 Generalized sector condition	
8.1.3 Conjectures of Aizerman and Kalman	
8.1.4 Analysis of absolute global stability	
8.1.5 On equivalency of Hermitian and quadratic forms	
8.1.6 Representation of the stability conditions in the frequency domain	
8.1.7 The Popov's line	
8.2 H_∞ Control	
8.2.1 The problem of perturbations attenuation in linear continuous-time systems	

8.2.2	H^∞ interpretation
8.3	The Kalman-Yakubovich-Popov frequency lemma
8.3.1	KYP -theorem
8.3.2	LMI representation of the perturbations attenuation problem
9	Dynamic Neural Networks Control
9.1	Neural Networks Structures
9.1.1	Recurrent Neural Networks
9.1.2	Differential Neural Networks
9.2	Neural State Estimation
9.2.1	Nonlinear Systems and Nonlinear Observers
9.2.2	The Nonlinear State Observation Problem
9.2.3	Observers for Autonomous Nonlinear System with Complete Information
9.2.4	Information
9.2.5	Observers for Controlled Nonlinear Systems
9.2.6	Robust Nonlinear Observer
9.3	Neuro Trajectory Tracking
9.3.1	Tracking Using Dynamic Neural Networks
9.3.2	Trajectory Tracking Based Neuro Observer
9.3.3	Dynamic Neuro Observer
9.3.4	Basic Properties of DNN-Observer
viii	CONTENTS
9.3.5	Learning Algorithm and Neuro Observer Analysis
9.3.6	Tracking stability analysis

Bibliografía

- [1] Zhou, K. and J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997
- [2] K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002
- [3] Vidyasagar, M., *Control System Synthesis: A Factorization Approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 1985
- [4] Leigh, J.R., *Control Theory*, The IET; 2nd edition edition, 2004
- [5] Francis, B.A. *A Course in H^∞ , Control Theory*. Lecture Notes in Control and Information Sciences Vol 88, Springer-Verlag, 1987

II.9. Matemáticas avanzadas I: Álgebra (120 horas; 20 créditos)

1. Grupos (40 horas).
Grupos, subgrupos, clases laterales izquierdas y derechas, teorema de Lagrange. Grupos abelianos, grupos cíclicos. Subgrupos normales. Homomorfismos e isomorfismos. Teoremas fundamentales de homomorfismos. Grupo de automorfismos de un grupo. Acción de un grupo sobre un conjunto o sobre otro grupo, estabilizador, órbita. Ecuación de clases. Conjugación. Teoremas de Cauchy y de Cayley. Grupos de permutaciones. Grupo simétrico y grupo alternante, simplicidad del grupo alternante A_n para $n \geq 5$. Teoremas de Sylow y algunas aplicaciones. Producto directo y producto semidirecto de grupos. Grupo holomorfo de un grupo dado. Grupos abelianos libres. Grupos abelianos finitamente generados. Descomposición. Grupos solubles y grupos nilpotentes. Series de composición de grupos finitos. Unicidad. Grupos libres, generadores y relaciones.
2. Anillos (30 horas).
Anillos, ideales derechos, izquierdos y bilaterales. Subanillos. Característica de un anillo. Homomorfismos de anillos y teoremas fundamentales. Anillos conmutativos, anillos con identidad. Dominios enteros. Ideales maximales, ideales primos. Conjuntos multiplicativos y localización de anillos. Campo de cocientes de un dominio entero. Dominios euclidianos, dominios de ideales principales (DIP) y dominios de factorización única (DFU). Anillos de polinomios. Polinomios irreducibles, lema de Gauss, polinomios de varias variables. Módulos sobre un anillo conmutativo. Módulos y anillos noetherianos. Teorema de la base de Hilbert.
3. Campos (30 horas).
Extensión de campos. Extensiones algebraicas. Extensiones normales. Extensiones algebraicas separables.

Campos de característica positiva. Inseparabilidad. Extensiones puramente inseparables. Teorema del elemento primitivo. Cerradura algebraica de un campo. Introducción a la Teoría de Galois. Automorfismos de campos y extensiones de Galois. Teorema Fundamental de la Teoría de Galois. Campos finitos. Unicidad de los campos finitos. Raíces n -ésimas de la unidad. Campos ciclotómicos. Aplicaciones de los campos ciclotómicos a la teoría de números (teorema de Dirichlet). Solubilidad por medio de radicales. Constructibilidad con regla y compás.

- Módulos y Álgebra Lineal (20 horas).
Módulos libres. Teorema de estructura de los módulos finitamente generados sobre un DIP. Valores y vectores propios. Teorema de Cayley-Hamilton. Formas canónicas: Jordan, racional. Formas simétricas, bilineales y cuadráticas. Formas bilineales no degeneradas y productos internos.

Referencias

- Artin, Emil, *Galois Theory*, Notre Dame Mathematical Lectures, 2, 1942.
- Bourbaki, Nicolas, *Algebra I & II*, Springer-Verlag, 1989 & 2003.
- Dummit, David S. & Foote, Richard M., *Abstract Algebra*, third edition, Wiley, 2004.
- Hartley, Brian & Hawkes, Trevor, *Rings, Modules and Linear Algebra*, Chapman and Hall, 1976.
- Herstein, Israel N., *Topics in Algebra*, second edition, Wiley, 1975.
- Hungerford, Thomas W., *Algebra*, GTM 73, Springer-Verlag, 1974.
- Jacobson, Nathan, *Basic Algebra I & II*, Freeman, 1974 & 1980.
- Jacobson, Nathan, *Lectures in Abstract Algebra*, Springer-Verlag, 1975.
- Lang, Serge, *Algebra*, third edition, Addison-Wesley, 1993.
- Rotman, Joseph J., *An Introduction to the Theory of Groups*, fourth edition, Springer-Verlag, GTM 148, 1995.
- Stewart, Ian, *Galois Theory*, third edition, Chapman and Hall, 2004.
- van der Waerden, Bartel L., *Álgebra 1 & 2*, Ungar, 1970.
- Vargas, José A., *Álgebra Abstracta*, Limusa, 1986.

II.10. Matemáticas avanzadas II: Análisis real (120 horas; 20 créditos)

- Introducción (20 horas).
La recta real: Los abiertos de la recta. El teorema de Baire. Funciones de variación acotada. Integral de Riemann-Stieltjes: Integración con respecto a funciones de variación acotada. Integribilidad de Riemann.
- Teoría de la medida (20 horas).
Clases de conjuntos. Funciones medibles. Medidas. Medidas exteriores.
- La integral (30 horas).
Integral de Lebesgue. Producto de medidas y teorema de Fubini. Integral de Lebesgue en \mathbb{R}^n . Medidas de Radon. Introducción a espacios topológicos: Espacios localmente compactos.
- Diferenciación (20 horas).
Medidas con signo: Descomposiciones de Hahn y variación de una medida. Teorema de Radon-Nikodym. Descomposición de Lebesgue. Diferenciación de integrales. Funciones convexas.
- Espacios de funciones (30 horas).
Los espacios L^p . Duales de los espacios L^p . Operadores acotados en L^p . Diferentes tipos de convergencia.

Referencias

- R.G. Bartle, *The Elements of Real Analysis*, 1964.
- J. Cerda, *Análisis Real*, 2000.
- R.M. Dudley, *Real Analysis and Probability*, 1989.
- E. Hewitt y K.R. Stromberg, *Real and Abstract Analysis: A Modern Treatment of the Theory of Functions of a Real Variable*, 1975.
- H.L. Royden, *Real Analysis*, 1968.

II.11. Matemáticas avanzadas III: Análisis complejo (120 horas; 20 créditos)

- Números complejos y funciones (20 horas).
Campo de los números complejos. Topología de \mathbb{C} , compacidad, conexidad. Funciones continuas. Proyección

estereográfica y esfera de Riemann. Sucesiones y series. Criterios de D'alambert, Cauchy, convergencia absoluta, criterio M de Weierstrass. Transformadas de Möbius: propiedad conforme, razón cruzada, simetría.

2. Funciones holomorfas y analíticas (30 horas).
Diferenciación compleja versus diferenciación real. Ecuaciones de Cauchy Riemann. Funciones armónicas y armónicas conjugadas. Series de potencias, radio de convergencia, Teorema de Cauchy-Hadamard, series de potencias para las funciones seno, coseno, exponencial, etc. Conformidad de las funciones holomorfas. Derivadas de series de potencias.
3. Integral de línea y tipo Cauchy (40 horas).
Integración compleja. Integral de línea, longitud de curvas. Curvas homotópicas. Conjuntos simplemente conexos. Función logaritmo. Integrales tipo Cauchy. Índice de una curva alrededor de un punto. Teorema de Cauchy-Goursat. Teoremas integrales de Cauchy para conjuntos convexos. Teoremas integrales de Cauchy. Fórmulas integrales de Cauchy. Desigualdades de Cauchy. Holomorfia y analiticidad. Primitivas de funciones holomorfas. Funciones enteras y meromorfas. Teoremas de Morera, Liouville, fundamental del álgebra, unicidad, del mapeo abierto, principio del módulo máximo, lema de Schwarz.
4. Series de Laurent, residuos y singularidades (30 horas).
Ceros y singularidades aisladas: singularidades removibles, polos y singularidades esenciales. Teorema de Casorati-Weierstrass. Series de Laurent. Residuos. Teoremas del residuo, del argumento y de Rouché. Cálculo de integrales reales. Funciones racionales y caracterización de las funciones meromorfas en la esfera de Riemann. Descomposición de las funciones racionales en fracciones parciales.

Referencias

1. Ahlfors, Lars V., *Complex Analysis*, McGraw-Hill, 1966.
2. Cartan, Henri, *Elementary Theory of Analytic Functions of One or Several Complex Variables*, Addison-Wesley, 1973.
3. Conway, John B., *Functions of One Complex Variable*, Springer-Verlag, 1975.
4. Churchill, Ruel V; Brown, James W. y Verhey, Roger F., *Complex Variables and Applications*, MacGraw-Hill, 1974.
5. Markushevich, A., *Teoría de las Funciones Analíticas*, Mir, 1970.
6. Rudin, Walter, *Real and Complex Analysis*, McGraw-Hill, 1974.
7. Volkovyski, L.I.; Lunts, G.L. y Aramanovich, I.G., *Problemas sobre la Teoría de Funciones de Variable Compleja*, Mir, 1972.
8. J. La Salle & S. Lefschetz, *Stability by Lyapunov's Direct Method with Applications*, Academic Press.
9. I. G. Petrovski, *Ordinary Differential Equations*, Dover.
10. L. S. Pontriaguin, *Ecuaciones Diferenciales Ordinarias*, Aguilar.
11. R. A. Struble, *Nonlinear Differential Equations*, McGraw Hill.

III.5. Temas de investigación del Depto. de Control Automático (30 horas; 5 créditos)

El objetivo de este seminario es mostrar las diferentes áreas de investigación cultivadas por los investigadores del Departamento de Control Automático. Todos los profesores tendrán una intervención equitativa en tiempo.

III.6. Seminario: Taller Experimental (30 horas; 5 créditos)

La finalidad del taller es permitir al participante la validación de conceptos teóricos propios del Control Automático en un ambiente experimental con sistemas físicos reales. Es importante mencionar que si bien en muchos casos el aprendizaje de conceptos del Control Automático mediante la simulación informática es adecuado, en muchos otros, la comprensión de su significado requiere de la experimentación con sistemas físicos reales. Debido a esto, dentro del programa de la maestría en ciencias en Control Automático del DCA se ha incluido este taller experimental que permitirá a los participantes sensibilizarse a los aspectos aplicados del Control Automático. El prototipo empleado es un motor de corriente directa con la instrumentación y la electrónica de potencia asociados. La implementación de las leyes de control será realizada en el ambiente de programación Matlab/Simulink/RTW/Wincon.

- Práctica 1: Familiarización con el ambiente de control en tiempo real Matlab/Simulink/RTW/Wincon y la plataforma de experimentación. Conceptos abordados: Noción de estado, control en tiempo real, simulación.
- Práctica 2: Control en velocidad de un motor de corriente directa utilizando leyes de control Proporcional y Proporcional-Integral. Conceptos abordados: Retroalimentación, Estabilidad, Acción Proporcional, Acción Integral, Sintonización, Incertidumbre, Robustez, Función de Transferencia, Regulación.
- Práctica 3: Control en posición de un motor de corriente directa utilizando leyes de control Proporcional y Proporcional-Derivativa. Conceptos abordados: Retroalimentación, Estabilidad, Acción Proporcional, Acción Derivativa, Sintonización, Función de Transferencia, Regulación, Noción de estado, Estimación de estados, Localización de polos, Amortiguamiento en Sistemas Mecánicos.
- Práctica 4: Control en posición de un motor de corriente directa utilizando un regulador Lineal Cuadrático (Linear Quadratic Regulador, LQR). Conceptos abordados: Retroalimentación, Estabilidad, Sintonización, Regulación, Noción de estado, Estimación de estados, Localización de polos, Optimalidad.