

Clase 9 - Especialidades de control

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Laboratorio de Control Automático (86.22)

Dr. Ing. Claudio D. Pose



- El diseño de controladores visto hasta el momento sólo cubre los conceptos más básicos y los sistemas más simples.
- Las plantas no suelen ser lineales, y tampoco invariantes en el tiempo.
- Las perturbaciones afectan mucho más al sistema de lo que se consideró hasta el momento, y suelen ser un factor crítico.
- Ni siquiera puede garantizarse que el sistema sea continuo.

- Por ejemplo, el problema de control de las toberas de un lanzador espacial para estabilizar el mismo.
- Las perturbaciones del viento cambian según la altura.
- La masa de combustible modifica el peso e inercia.
- Cambia la gravedad según la altura.
- La desconexión de las etapas provocan cambios discontinuos al modelo.
- Involucran acciones de control tipo on/off.

- Para cada problema, se requieren acciones de control basadas en leyes más complejas que una realimentación de estado o loop shaping.
- Incluso el problema de identificación online de un sistema puede requerir técnicas mas complicadas para plantas no lineales.
- En el peor de los casos, se desconoce el modelo de la planta, las condiciones de operación, y las perturbaciones.

Control no lineal

Los sistemas de control no lineales permiten trabajar con el modelo real (al menos el modelado) sin necesidad de limitarse a la linealización en torno a un punto.

- Tienen diferentes métodos de análisis, como ser el plano de fases, o estabilidad de Lyapunov.
- A veces alcanza con llevar al sistema en torno a un punto (estable), en lugar de exactamente a ese punto (asintóticamente estable).

Control no lineal - Backstepping

- Es un método recursivo basado en la generación de un conjunto de estados $[z_1, z_2, \dots, z_k]$ adicionales al vector de estados x , donde $\dot{x} = f(x) + g(x)z_1$ y $\dot{z}_i = f(x, z_1, \dots, z_i) + g(x, z_1, \dots, z_i)z_{i+1}$.
- La idea es estabilizar x mediante un controlador z_1 . Luego, se diseña z_2 para que genere el z_1 deseado, y así sucesivamente hasta diseñar el u que controla el estado z_k , de ahí el nombre de backstepping.
- Es útil para sistemas muy complejos o imposibles de linealizar.

Control no lineal - Modos deslizantes

- Es un control discontinuo tipo on/off entre dos niveles predefinidos.
- Se define un hiperplano en el espacio de estados al cual debe converger su comportamiento.
- Si el sistema se encuentra de un lado u otro del hiperplano, la acción de control es aquella que lo lleve al lado contrario.

Control no lineal - Diseño por Lyapunov

- Se utiliza en plantas con incertidumbre acotada.
- Se propone una función no lineal G tal que $\dot{x} = f(t, x) + G(t, x)u$, donde f es la dinámica no lineal de los estados x .
- Se define una función de Lyapunov $V_o(t)$ dependiente de los estados y el controlador que cumple $\dot{V}_o = d(V_o)/dt = d(V_o)/dx \, dx/dt < 0$
- Se diseña G tal que garantice la estabilidad de la planta nominal, con backstepping o realimentación no lineal de estados.
- Luego, se agrega un término adicional al controlador para rechazar las perturbaciones acotadas.

Se refiere a sistemas de control donde pueden ocurrir variaciones continuas y discretas de un sistema.

- Se tiene un conjunto de estados posibles para el sistema.
- Se tiene un modelo continuo de la evolución del sistema para cada estado.
- A medida que el sistema evoluciona de manera continua, puede ocurrir un evento que lo hace cambiar de estado.

- Permite modelar y controlar una gran variedad de sistemas.
- Por ejemplo, en un sistema donde se deben administrar la cantidad de recursos computacionales para las diferentes tareas a resolver.
- La entrada y procesamiento de información es representada por un modelo continuo.
- Eventualmente, ocurre un evento que cambia dicho modelo y aumenta sensiblemente la cantidad de datos de entrada.

Es un enfoque de diseño de control orientado a garantizar el funcionamiento del controlador ante incertezas y/o perturbaciones acotadas en el modelo.

- Siempre se apunta a obtener garantías en el funcionamiento del controlador ante incertezas del modelo.
- Es un criterio necesario, por ejemplo, para diseño de controladores para plantas diseñadas en serie, sujetas a variaciones en la producción.
- Diseños básicos como los de alta ganancia proporcional son efectivos para este objetivo, pero requieren acotar la acción de control. De hecho, modos deslizantes se considera un control robusto. También el root locus.

- Se lleva la planta a un formato particular donde se consideran como entradas las referencias, acciones de control y perturbaciones, y la salida como las variables medidas, y el error que se desea minimizar.
- Se establece la relación entre las posibles perturbaciones y el error que se desea minimizar.
- Se diseña un controlador que minimice la norma H_∞ de dicha relación.
- El controlador se puede obtener por parametrización de Youla (orden alto) o resolviendo un sistema de ecuaciones de Riccati (simplificación).

Es un método de diseño para sistemas donde los parámetros varían en el tiempo, o al menos no se conocen en el modelo.

- Requiere identificación del sistema, particularmente identificación en tiempo real, para hacer tracking de los parámetros variantes.
- Se pueden utilizar los parámetros para actualizar el modelo de la planta, el diseño del controlador, o ambos, en tiempo real.

Control adaptativo - Gain Scheduling / LPV

- Se basa en la linealización de varios puntos de la planta, y el diseño de un controlador para cada uno de ellos.
- De acuerdo a un parámetro que varía linealmente, se puede seleccionar o ajustar el controlador para la zona próxima al punto de linealización.

Control adaptativo - Cuadrados mínimos recursivos

- Resuelve un problema de cuadrados mínimos iterativamente para encontrar los parámetros que minimizan una función de costo pesada.
- Se utiliza un modelo del sistema y la información de los comandos generados y las salidas medidas.
- Se buscan los parámetros que mejor ajusten a la respuesta entrada-salida.

Son técnicas que se basan en una función de costo para llevar al sistema de un punto a otro en un tiempo finito.

- Se utilizan frecuentemente en control de procesos.
- Requieren de un buen modelo del sistema para predecir el comportamiento a lo largo de un período de tiempo.
- Se basan en una predicción de M pasos discretos o a lo largo de un período Δt continuo de las acciones de control y estados del sistema.

Control óptimo - Model Predictive Control (MPC)

- Permite establecer una penalización determinada para desvíos o valores altos de cualquier variable del sistema, como ser el error de la salida, el desvío del vector de estados, acciones de control elevadas, etc.
- La función costo es del tipo $J = \sum_{i=0}^N \omega_{x_i} (r_i - x_i) + \sum_{i=0}^M \omega_{u_i} u_i$, para N estados que se desean controlar con M acciones de control independientes.
- Se genera una serie de acciones de control para llevar al sistema al punto deseado, que se actualizarán en el siguiente cálculo de la ley de control.

Control óptimo - Linear Quadratic Regulator (LQR)

Es otra técnica que se basa en minimizar una función de costo para llevar al sistema de un punto a otro.

- Permite establecer una penalización determinada para desvíos o valores altos de cualquier variable del sistema.
- Puede plantearse para un sistema continuo o discreto, tiempo finito o infinito.
- La función de costo es $J = \sum_{k=0}^N (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k + 2x_k^T N u_k)$, con N siendo acotado o infinito, y utilizando sumatoria o integral.
- Resulta en un controlador $u = Kx$, con K dependiendo de las matrices Q , R , N y una matriz P que resulta de resolver una ecuación de Riccati.
- Se genera una serie de acciones de control para llevar al sistema al punto deseado, que se mantienen hasta el horizonte de tiempo utilizado.

Reinforcement Learning (RL)

Las técnicas basadas en aprendizaje estadístico tomaron gran relevancia con las mejoras en la capacidad de cómputo disponibles.

- Se basa en un sistema similar al control óptimo, maximizando una recompensa a lo largo de una serie de pasos temporales.
- Es útil cuando el sistema es extremadamente complejo, difícil de modelar completamente, o requiere exploración.
- Puede indicar variables relevantes de un conjunto muy amplio.
- Permite buscar soluciones razonables a problemas donde los eventos que puedan suceder y la evolución del sistema sean desconocidos.

Reinforcement Learning (RL)

- Se define un conjunto de acciones finito A para el sistema a controlar (agente), el cual puede encontrarse dentro de un conjunto de estados S .
- Se define la probabilidad de pasar de un estado $s \in S$ a otro $s' \in S$ al tomar una acción $a \in A$, denominado $P_a(s, s')$, y la recompensa que se obtiene al hacerlo $R_a(s, s')$.
- El objetivo es descubrir la *policy* $\pi = P(a_t = a | s_t = s)$ (qué acción es la mejor a tomar según el estado en que se encuentre) que maximice la recompensa acumulada.
- Este diseño probabilístico permite que a veces se explore una opción previamente considerada no óptima, lo que permite tratar con cambios del sistema a lo largo del tiempo.