



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
IEE2683 – LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO

Experiencia 2: Identificación de Sistemas y Loop Shaping

2 Semanas

1. Introducción

El diseño de controladores tiene como objetivo sintetizar una estructura matemática, capaz de modificar la respuesta natural de los sistemas con el fin de cumplir con especificaciones de desempeño. Dichas especificaciones se formulan en el dominio del tiempo o de la frecuencia y apuntan a mejorar la estabilidad, ancho de banda y tolerancia a perturbaciones.

Para diseñar el algoritmo de control se debe contar con información del sistema a intervenir, la cual se puede representar con un modelo, habitualmente, dinámico. La derivación de modelos se realiza inicialmente a partir de primeros principios, aplicando las leyes fundamentales para obtener un sistema de ecuaciones diferenciales que describen la respuesta del sistema. Los modelos basados en primeros principios tienen un conjunto de parámetros asociados que deben ser identificados experimentalmente utilizando datos de entrada-salida en lo que se conoce como el proceso de identificación de parámetros, el cual muchas veces no es exitoso debido a la estructura de los modelos. Como alternativa, cuando la aplicación de primeros principios es difícil o resulta en un modelo intratable, existe la posibilidad de aproximar el comportamiento del sistema con un modelo de estructura arbitraria en lo que se conoce como modelos de caja negra. El modelado del tipo caja negra asume una estructura, generalmente lineal, y mediante entrenamiento con datos entrada-salida se determinan los parámetros del modelo. Ejemplos de estructuras usadas en modelado del tipo caja negra incluyen modelos ARX, ARMAX y ARIMAX, entre otros. Existen distintas técnicas para identificar los parámetros de modelos, ya sean basados en primeros principios o del tipo caja negra, las cuales se conocen como técnicas de identificación paramétricas.

Alternativamente, en lugar de representar el proceso mediante un conjunto de ecuaciones, se puede caracterizar el proceso mediante su respuesta fundamental: respuesta al impulso o respuesta en frecuencia, en lo que se conoce como modelos no-paramétricos. En la práctica, sin embargo, en lugar de la respuesta al impulso se obtiene la respuesta al escalón mediante un cambio temporal en el set-point del proceso. El uso de escalones para identificar la respuesta dinámica del proceso se usa habitualmente en plantas químicas cuyos procesos poseen polos estables y profundos. La caracterización de procesos mediante la respuesta fundamental asume intrínsecamente que los procesos son lineales e invariantes en el tiempo, lo que limita la aplicabilidad y requiere conocimiento previo. El procedimiento para identificar la respuesta fundamental de los procesos, ya sea en el dominio del tiempo o la frecuencia, consiste en construir una serie de señales de prueba, e.g. escalones, y estudiar las relaciones entrada-salida. Al no haber parámetros involucrados en la identificación, las técnicas que buscan obtener la respuesta fundamental se conocen como técnicas de identificación

no-paramétricas.

El método de diseño de controladores está directamente relacionado con el tipo de modelo que se encuentra disponible. Una opción es contar con un modelo paramétrico del sistema y diseñar un controlador basado en modelos, como controladores predictivos o del tipo *state-feedback*. Alternativamente, se puede caracterizar el proceso mediante su respuesta fundamental y diseñar el controlador usando criterios de desempeño en el dominio de la frecuencia. La sintonización de controladores del tipo PID es un ejemplo de diseño basado en la respuesta fundamental del sistema.

Un método ampliamente utilizado para diseñar controladores usando la respuesta en frecuencia del sistema es el llamado método de *loop-shaping*. En él, se formulan las especificaciones de lazo cerrado como un conjunto de requerimientos sobre la respuesta en lazo abierto del sistema en cascada con un controlador proporcional. El controlador se modifica agregando bloques compensadores en cascada hasta cumplir con las especificaciones de diseño.

La presente experiencia consiste en estudiar métodos de identificación no-paramétrica, en lazo abierto y lazo cerrado, y el método de diseño de controladores por *loop-shaping*. En particular, se debe diseñar e implementar rutinas de identificación no-paramétricas en lazo abierto para estimar la respuesta en frecuencia de un proceso desconocido. Posteriormente, se debe diseñar e implementar una rutina de identificación no-paramétrica en lazo cerrado para un proceso inestable en lazo abierto, y diseñar e implementar un controlador usando el método de *loop-shaping* para cumplir con ciertos objetivos de desempeño.

2. Trabajo Previo

Defina los siguientes conceptos:

1. Modelos ARX, ARMAX y ARIMAX
2. Modelos NARMAX
3. Pseudo-random-binary-sequence (PRBS)
4. Ventana de Hamming
5. Ventana de Hanning
6. Espectro de coherencia
7. Frecuencia *crossover*
8. Margen de ganancia.
9. Margen de fase.
10. Ancho de banda del lazo de control.

Estudie el efecto sobre la respuesta en frecuencia de los siguientes compensadores:

1. Ganancia estática.

2. Controlador PI.
3. Compensador de fase en adelanto.
4. Compensador de fase en atraso.

Baje los archivos de apoyo de la página web del curso, ejecute el archivo `testid.m` y responda las siguientes preguntas:

1. ¿Qué rol cumplen los retenedores de orden 0?
2. ¿Existe ruido en la salida del sistema?
3. ¿Qué entrada se está aplicando al sistema?
4. ¿Qué puede inferir del sistema mirando la respuesta?

Utilizando los apuntes sobre identificación y el archivo `testid.m`, construya un *script* esqueleto que aplique entradas y capture salidas del proceso, defina parámetros de operación, y llame funciones para ejecutar el procesamiento de los datos.

Ejecute el archivo `testet.m` y responda las siguientes preguntas:

1. ¿Es el sistema estable en lazo abierto?
2. ¿Qué tipo de controlador actúa sobre la planta?
3. ¿Existen perturbaciones o ruido en el sensor?
4. ¿Qué puede inferir del sistema mirando la respuesta?

Utilizando los apuntes sobre identificación y el archivo `testet.m`, construya un *script* esqueleto que aplique entradas y capture salidas del proceso, defina parámetros de operación, y llame funciones para ejecutar el procesamiento de los datos.

3. Desarrollo de la Experiencia

3.1. Identificación en Lazo Abierto

Diseñe un *script* de identificación en Matlab para el proceso desconocido que entregue los siguientes resultados:

1. Estimación del diagrama de Bode del proceso (magnitud y fase).
2. Estimación del espectro del ruido presente en la salida.
3. Estimación del espectro de coherencia.
4. Estimación del diagrama de Bode considerando rango de frecuencias confiable.

Su *script* de identificación debe tener por nombre `mainID.m` y llamar funciones auxiliares (escritas por usted) para el procesamiento. El *script* debe aplicar entradas y capturar las salidas del proceso mediante la función *sim*. Para obtener buenas estimaciones, considere el siguiente procedimiento guía:

1. Simule el proceso con entrada 0.
2. Simule el proceso con entradas en escalón de diferentes magnitudes.
3. Simule el proceso con entradas sinusoidales de diferente magnitud y frecuencia.
4. Determine la frecuencia de muestreo adecuada para el proceso basándose en los resultados.
5. Diseñe una PRBS que servirá como entrada de identificación.
6. Filtre los datos en el dominio del tiempo.
7. Diseñe una función de enventanado.
8. Procese los datos para obtener estimaciones de los espectros.
9. Obtenga el espectro de coherencia y defina un umbral de confianza.
10. Obtenga los gráficos pedidos.

3.2. Identificación en lazo cerrado y loop-shaping

Diseñe un *script* de identificación en lazo cerrado en Matlab (debe tener por nombre mainCT.m) para el proceso desconocido que entregue los siguientes resultados:

1. Estimación del diagrama de Bode del proceso (magnitud y fase).
2. Estimación del diagrama de Nyquist del proceso.
3. Estimación del espectro de coherencia.
4. Estimación de los diagramas de Bode y Nyquist considerando rango de frecuencias confiable.

Usando la estimación de la respuesta en frecuencia del proceso, diseñe un controlador usando el método de *loop-shaping* que mejore la respuesta del sistema, con respecto a la respuesta usando el controlador dado en el archivo ejemplo, según los siguientes criterios:

1. Ausencia de error permanente.
2. Atenuación de oscilaciones en la variable controlada en un factor menor a 0.1.

Debe presentar gráficos que demuestren el proceso de diseño y la respuesta de su controlador debidamente comparada con la respuesta del controlador dado en el archivo ejemplo testct.m.

4. Informe Final

El informe debe contener:

1. Un diagrama de flujo del procedimiento de identificación.
2. Gráficos pedidos y un análisis de los resultados.
3. Reporte detallado del diseño de compensadores, justificando la estructura usada y su efecto sobre la respuesta del sistema.
4. Un anexo con los códigos principales y todas las funciones auxiliares debidamente comentadas.

5. Evaluación

La nota de la experiencia se distribuye como:

- Calidad de las estimaciones de la etapa Identificación: 30 %.
- Calidad de las estimaciones y respuesta del controlador de la etapa Loop-shaping: 30 %.
- Informe: 30 %.
- Preguntas hechas durante el desarrollo: 10 %.