

SISTEMA DE CONTROL PARA SERVO MECANISMOS

Marco Antonio Pérez Cisneros* y Elke Laubwald⁺

*División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

⁺Consultor "Control Systems Principles"

RESUMEN: Este artículo pertenece a la serie de notas de aplicación en modelado y control de sistemas que han sido creadas por "Control Systems Principles" para ilustrar los principios básicos de la teoría de control. Dichos fundamentos incluyen algunos sistemas genéricos y métodos que son comunes en todas las áreas del desarrollo tecnológico y la industria. Estas notas de aplicación buscan explicar dichos sistemas y sus principios de una manera clara y fácil de entender. Por tanto las notas describen primero las características más importantes de un sistema, como funciona y finalmente como puede ser controlado. Diferentes sistemas en tiempo real son utilizados para demostrar la viabilidad de los algoritmos de control. Dichos sistemas han sido diseñados por nuestro fundador Prof. Peter Wellstead y son manufacturados por "TQ Education & Training Ltd" bajo la línea CE. Cuando es posible, las notas de aplicación incluyen también los resultados de los experimentos utilizando estos sistemas. En particular, esta nota de aplicación discute sobre el control de servo mecanismos que son el clásico "caballo de batalla" para estudiar sistemas electromecánicos.

1. ¿Que es un sistema de control?

Un sistema de control para servo mecanismos es uno de los más importantes y conocidos sistemas de control. Cualquier máquina que requiera de rotación continua necesita un sistema de servo control. Sus principales objetivos son:

- Mantener la velocidad del motor constante entre ciertos límites, aun cuando la carga en la entrada del motor pueda variar. Esto es comúnmente conocido como *regulación*.
- Variar la velocidad y la carga de acuerdo a un programa de requerimientos normalmente externo al sistema. Esto es también conocido como *seguimiento* de una referencia.

Nuestra vida diaria depende del control de servo mecanismos. En cualquier lugar donde haya un motor tendrá que existir un sistema para su control, lo que lo hace muy importante. Tanto así que la economía del mundo también depende de estos controladores. (¡Aunque con seguridad existen muchos otros factores, por ahora consideremos solo los sistemas de control!). Toda la industria de manufactura se detendría de no ser por los sistemas de servo control debido a que las líneas de producción no podrían ser controladas, el transporte al interior de las fabricas tendría que detenerse porque las unidades de tracción eléctrica fallarían, las computadoras no podrían funcionar por que los discos duros no operarían sin controlar la velocidad de sus discos internos y las redes de comunicaciones también fallarían por que los servidores de red utilizan discos duros que giran a altas velocidades. La gente joven seria insoportable y se quejaría aun más de lo que normalmente lo hacen debido a que su música y juegos no operarían sin servo controladores.

Por lo tanto, el control de servo mecanismos es tan importante que es vital discutir sobre ello. Pon atención que no estamos de vacaciones y esto no lo estoy escribiendo por el bien de mi salud.

2. Modelado de un sistema de control para servo mecanismos.

Antes de controlar un sistema, necesitamos primero entender en términos matemáticos como se comporta dicho sistema sin control alguno. A esto se le conoce como modelado de sistemas y es parte fundamental del análisis del sistema de control. La forma básica de un servo mecanismo esta conformada por un motor eléctrico cuyo eje tiene una carga inercial J con fricción en las escobillas del motor y también en la carga (esto es representado por la constante b). Existe un circuito de manejo que transforma un voltaje de entrada $u(t)$, por medio del motor, en un torque aplicado al eje $T(t)$.

Mediante los principios de modelado de sistemas, es posible encontrar un balance de torques entre el torque de entrada generado por el motor y el torque requerido para acelerar la carga venciendo la fricción como sigue:

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T(t)$$

Donde θ es la posición angular del eje del motor. El objetivo regular la posición del eje del motor o su velocidad $\dot{\theta}$ de acuerdo a un valor deseado. El voltaje de entrada $u(t)$ esta relacionado con el torque $T(t)$ mediante una **ganancia** K . La inercia dividida entre el coeficiente de fricción es conocida como la **constante de tiempo** del sistema τ , donde $\tau = J/b$. Entonces el modelo del sistema puede ser expresado como:

$$\tau\ddot{\theta} + \dot{\theta} = Ku(t)$$

En sistemas de servo control prácticos, existen componentes adicionales del modelo que son importantes. Muchos de ellos están relacionados con las no linealidades en el amplificador del servo controlador y a la fricción en componentes mecánicos. Las mas importantes no linealidades están en el voltaje de saturación del motor que es proporcionado por el amplificador que maneja el motor, la banda muerta en el amplificador también conocida como la fricción de Coulomb en componentes rotacionales y la histéresis en cualquier caja de velocidades que pueda existir entre el motor y su carga. Un buen sistema de control deberá incluir funciones para trabajar con estas características no lineales.

En esta nota de aplicación, nos concentramos en las partes lineales del sistema de servo mecanismos y solamente algunos de los aspectos no lineales son comentados. La parte lineal del modelo del servo sistema pueden ser expresadas como función de transferencia como sigue:

$$y(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} u(s)$$

Con $y(s)$ siendo la posición de salida del eje del motor y $u(s)$ es la entrada del motor. K es la ganancia del sistema y τ es al constante de tiempo.

Un importante trabajo para el analista de sistemas de control es como medir los valores de las ganancias K y la constante de tiempo τ . Para hacer más fácil la discusión vamos usar como ejemplo el entrenador CE110 creado por TQ. La ganancia entre la entrada del motor y la velocidad del motor ha sido diseñada para adoptar un valor de 1 mientras la ganancia entre las mediciones de velocidad y posición del eje del motor es igual a 2. El valor nominal de la constante de tiempo puede ser definido como 1.5. Entonces la función de transferencia del modelo puede ser descompuesta en la función de transferencia de la entrada del motor con respecto de la velocidad $v(s)$, y la función de transferencia desde la velocidad del motor con respecto de la posición del eje a la salida, como sigue:

$$v(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)} u(s)$$

$$y(s) = \frac{K}{s} v(s)$$

Muchas de las herramientas de diseño de sistemas de control utilizan la representación de espacio-estado del modelo del sistema. En sistemas servo, los estados son la velocidad y la posición del eje de sistema de servos. Arreglando el modelo de la función de transferencia, el sistema puede ser expresado en espacio de estados como se muestra:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K \\ 0 & -\tau^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tau^{-1} \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

donde: $x_1 = \theta = y$ = posición angular a la salida y

$x_2 = \dot{\theta} = v$ = velocidad angular

Que puede ser también escrito como sigue:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{b}u$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & K \\ 0 & -\tau^{-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau^{-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nota que las variables en el sistema de espacio-estado son la posición del eje θ medido por medio de codificadores de posición o potenciómetros y la velocidad v utilizando un codificador de velocidad.

Los modelos lineales de arriba son la base en el diseño de controladores para servo mecanismos. Sin embargo, un sistema servo real tendrá componentes no lineales que afectan su comportamiento dinámico. Las principales no linealidades son la fricción de Coulomb en partes móviles y la zona muerta en la saturación del amplificador de entrada. Un sistema avanzado de control para tratar estas características escapa de los objetivos de esta nota y por tanto no son considerados en este trabajo.

3. Un sistema servo de ejemplo

La figura 1 muestra el entrenador de servo mecanismos CE110 diseñado por “TQ Education and Training Ltd”. El sistema es una clásica representación completa del problema de control con servo mecanismos que incluye todas las características del sistema real. En la zona del centro del aparato están los principales dispositivos que conforman la planta, desde la izquierda tenemos:

1. La carga inercial
2. El sensor de velocidad.
3. Una carga activa, en este caso el generador G.
4. El motor del servo mecanismo, M
5. Un embargue eléctrico y la caja de velocidades (¿alcanzas a ver la fotografía de la caja de velocidades en la parte derecha?)
6. Finalmente, bajo la caja de velocidades esta el eje de salida con el sensor de posición.

El embargue eléctrico permite desconectar el sistema de posición para estudiar los problemas relacionados con el control de velocidad. La caja de velocidades se incluye por que normalmente un servo mecanismo para control de posición tiene una transmisión para reducir velocidad e incrementar el torque. El generador es incluido de manera que el control de una carga variable puede también ser investigado.



Figura 1: El sistema entrenador de servo mecanismo CE110

En la parte superior del panel frontal están las versiones electrónicas de todos los elementos no lineales comúnmente encontrados en servo mecanismos reales. Pueden ser usados para enseñar compensación no lineal y para entender que se busca realmente en situaciones prácticas. Usaremos el motor lineal con la carga interna y la salida de posición regulada por la caja de velocidades para ilustrar la acción del servo control. Puede ser que podamos ver un comportamiento no lineal pero eso depende si te portas bien y lees atento mientras yo sigo escribiendo estas notas de aplicación.

4. Controladores del sistema de servo.

Existen muchas alternativas en la teoría de control para diseñar el controlador de un servo mecanismo. Realmente son muchas alternativas, por ejemplos las siguientes técnicas:

1. Control PID de tres términos.
2. Control basado en la retroalimentación de velocidad.
3. Compensación de fase en adelanto.
4. Control por retroalimentación de estados.
5. Implementación de observadores de estado y control.
6. Regulador cuadrático lineal (LQR)
7. Regulador cuadrático lineal Gaussiano (LQG)
8. Control Robusto
9. Control de estructura variable y de modo corredizo.
10. Control "Dead Beat"

Cada uno de los anteriores puede ser implementado como un método continuo o como método digital basado en transformada Z. También es posible utilizar otras técnicas como Lógica Difusa y sus variantes que pueden ser también una opción muy interesante. De cualquier manera se requiere especial cuidado en el diseño y un amplio conocimiento del problema de control. Por ejemplo, control robusto ofrece los mejores resultados técnicos y prácticos, pero un experto es requerido para seleccionar los factores de diseño y para generar un controlador que sea fácil de implementar.

En general, una técnica de control determinada puede ofrecer diferentes ventajas para ciertas aplicaciones dependiendo de la situación práctica en la cual el servo mecanismo es usado. Precisamente aquí es donde la experiencia con equipo real es importante. El uso de un equipo real como el entrenador de servo

mecanismos CE110 ayuda enormemente para descubrir las características especiales de las diferentes técnicas y los resultados correspondientes cuando diferentes estrategias de control son aplicadas a una maquina con servo mecanismos. Las simulaciones son de cualquier manera necesarias para probar el diseño, pero no incluyen el problema real por completo.

5. Ejemplo del diseño de un controlador para un servo mecanismo.

Solamente se ilustra un problema de control utilizando variable de estado. La retroalimentación de estado es implementada en el entrenador servo CE110 y los resultados de la simulación se comparan con los resultados en tiempo real. La retroalimentación de estados utiliza la forma lineal del espacio de estados.

El controlador de retroalimentación de estados es:

$$u(t) = K_{css} r(t) - \mathbf{K}_{css}' \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Donde $\mathbf{K}_{css} = \begin{bmatrix} K_{css_1} \\ K_{css_2} \end{bmatrix}$ es la ganancia de la retroalimentación de estados.

La señal $r(t)$ es la señal de referencia, también conocida por su nombre corto en ingles "setpoint". La salida del servo mecanismo $y(t)$ tendrá que seguir dicha señal de referencia.

En retroalimentación de estado, la respuesta del sistema de lazo cerrado puede ser definida combinando ley de control con el vector de estados y seleccionando una ganancia de retroalimentación \mathbf{K}_{css} adecuada para obtener los polos de lazo cerrado deseados que determinan la respuesta transitoria deseada. Algunos patrones ideales para los polos de lazo cerrado son:

- Sistema de segundo orden con el factor de amortiguamiento y ancho de banda especificados por el usuario.
- Polos de segundo orden para una respuesta plana máxima del tipo Butterworth, con el ancho de banda especificado por el usuario.
- Polos de segundo orden para una respuesta Bessel con el ancho de banda especificado por el usuario.

Usando los parámetros nominales del entrenador servo CE110 que fueron mencionados antes, es posible calcular las ganancias para la retroalimentación de estados que ofrecen el rendimiento deseado. Por ejemplo, las ganancias que ofrecen una respuesta de lazo cerrado con una frecuencia no amortiguada de 3 radianes por segundo y un factor de amortiguamiento de 0.5 son:

$$\mathbf{K}_{css} = \begin{bmatrix} 6.75 \\ 3.5 \end{bmatrix}$$

Estas ganancias son valores muy razonables (no muy grandes) y por lo tanto la respuesta deseada puede ser implementada en el sistema servo en el que estamos trabajando. Para probar estos valores, el controlador es implementado primero en una simulación del servo mecanismo y después en tiempo real. Para esto yo he utilizado el programa CE2000 que es un ambiente de simulación grafica y control en tiempo real, aunque otras herramientas de software pueden ofrecer resultados similares. Para validar el controlador en la planta real, la interfase de tiempo real del CE2000 puede conectarse directamente con el entrenador servo CE110 e interactuar directamente con el servo mecanismo real.

Los resultados de aplicar el controlador de retroalimentación de estados a la simulación lineal del entrenador servo se muestran en la figura 2. Nota que la respuesta es perfecta. El sobre-tiro y el periodo de oscilación de la señal de salida son correctos con respecto del factor de amortiguamiento deseados y la frecuencia natural no amortiguada. Sin embargo, la respuesta no es tan buena (ver la figura 3) cuando vamos al sistema real y usamos valores realizables para los voltajes de saturación del amplificador con

bandas muertas y fricción de Coulomb. Anteriormente dijimos que incluiríamos algunos resultados no lineales ¿no? Para vencer el comportamiento no lineal es necesario experimentar con las respuestas deseadas de manera que evitemos excitar dicho comportamiento no lineal y también necesitamos introducir algunos compensadores de fricción especiales. Esto escapa de lo que podemos hacer en estas notas de aplicación.

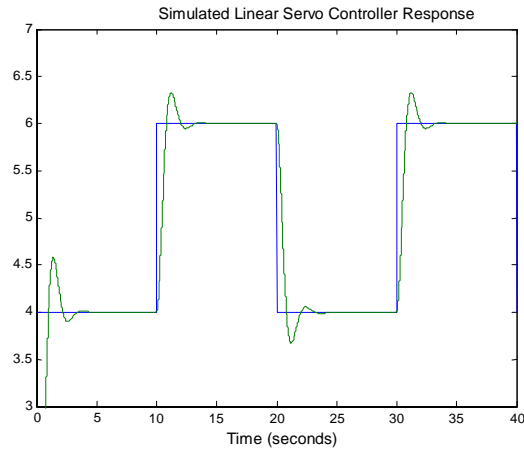


Figura 2: Respuesta ideal en simulación usando la retroalimentación de estado.

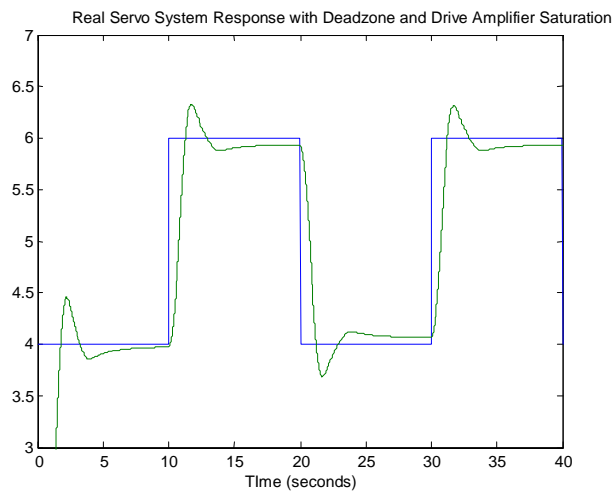


Figure 3: Respuesta en tiempo real usando la retroalimentación de estado con componentes no lineales.

6. Algunas conclusiones finales de los autores.

Esperamos que estas notas de aplicación puedan aportar algunas ideas sobre el control de sistemas de control para servo mecanismos. Pedimos disculpas por adelantado por que no podemos contestar tus preguntas o dudas sobre detalles en el contenido de estas notas por que aun tenemos mucho trabajo por hacer. Para mas información sobre los sistemas de entrenamiento con servo mecanismos CE110, consulta la pagina de Internet de TQ, utiliza las ligas de interés en nuestro sitio Web o escribe directamente a TQ en el correo electrónico: info@tq.com. Para aprender más sobre control de servo mecanismos debes leer un libro sobre control. Existen muchos libros muy buenos en teoría de control, como por ejemplo el libro de Sistemas Modernos de Control de R.C. Dorf y R.H. Bishop, publicado en español por Addison Wesley.