



EXPERIENCIA: CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS (MPC)

EL5205 Laboratorio de Control Avanzado

Profesor: Doris Sáez Hueichapan.

Auxiliar: Oscar Cartagena.

Fecha de entrega del enunciado: 06/09/2017

Fecha de presentación: 13/09/2017

Fecha de recepción de informe: 06/10/2017

1. Introducción

En la presente experiencia de laboratorio, se dispone de un sistema con tres grados de libertad, el cual evoluciona según una dinámica no lineal. Este sistema corresponde a la grúa presente en el laboratorio (ver Figura(1)). El subsistema denominado Tower (por su nombre en inglés, Torre) está encargado de manipular el ángulo en el brazo de la grúa. También, se distingue el subsistema denominado Jib (por su nombre en inglés, Brazo), está encargado de mover el carro a lo largo del brazo de la grúa. Finalmente, se encuentra el subsistema denominado Payload (por su nombre en inglés, Carga), cuyo objetivo es manipular la altura a la que se encuentra la carga.

Por simplicidad, y para realizar una experiencia introductoria al manejo de la grúa y el diseño de estrategias de control predictivo (MPC), es que se utiliza en la experiencia sólo los subsistemas Torre y Brazo, dejando fuera al subsistema Carga.

Cada subsistema está compuesto por una entrada, que corresponde a la corriente eléctrica que circula por el motor involucrado para realizar un movimiento:

- **Torre:** Este subsistema se puede observar en la Figura (2) (a). Salidas importantes son el ángulo θ que mide el desplazamiento radial del brazo con respecto a la torre y el ángulo correspondiente al bamboleo transversal (α), tomando como referencia la torre.
- **Brazo:** Salidas importantes asociadas a este subsistema son la distancia x que mide el desplazamiento del carro en el brazo y el ángulo de bamboleo en dirección radial (γ), como se puede observar en la Figura (2) (b).

La motivación de la experiencia radica, principalmente, en el problema asociado a la traslación de objetos por medio de una grúa, considerando, por una parte la minimización de la oscilación sobre la carga y, por otra, optimización en el tiempo de traslación. En este sentido, el control predictivo basado en modelos busca minimizar una función de costos que considere los aspectos mencionados anteriormente.



Figura 1: Grúa con tres grados de libertad

Considerando los subsistemas Torre y Brazo, se proveen los siguientes modelos en el espacio de estados, que se obtienen a partir de una linealización en tiempo continuo. En primer lugar, para el control de la Torre se plantea el siguiente modelo en variables de estado:

$$\dot{X}_T = \mathcal{A}_T X_T + \mathcal{B}_T U$$

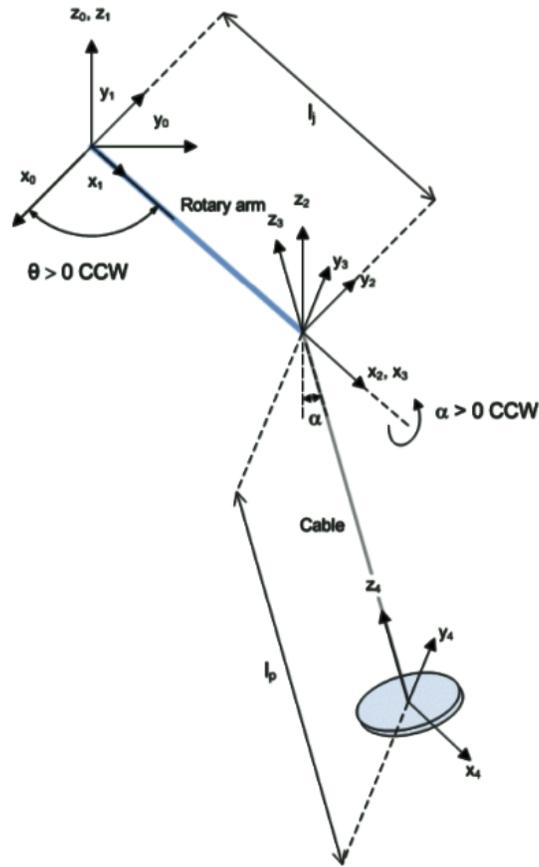
El vector de estado de la Torre es $X_T = [\theta \quad \alpha \quad \dot{\theta} \quad \dot{\alpha}]^T$. U es la corriente que entra al subsistema torre, θ es el ángulo de desplazamiento del brazo de la grúa y α es el bamboleo transversal. Las matrices del espacio de estado correspondientes a este subsistema se muestran a continuación.

$$\mathcal{A}_T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1,3108 & 0 & 0 \\ 0 & -12,5835 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

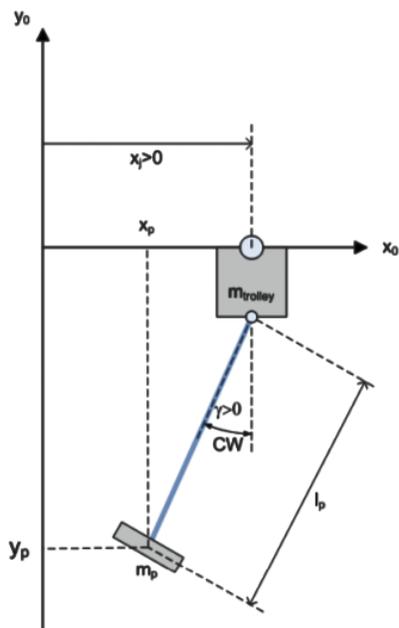
$$\mathcal{B}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1006,529 \\ -939,9211 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{C}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{D}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



(a) Cinemática del subsistema Torre



(b) Diagrama de Cuerpo Libre. Subsistema Brazo

Figura 2: Subsistemas de la grúa.
 3 DOF Crane User Manual



Por otra parte, para el control del Brazo se plantea el siguiente modelo en variables de estado:

$$\dot{X}_J = \mathcal{A}_J X_J + \mathcal{B}_J U$$

El vector de estado del Brazo de la grúa (Jib) es $X_J = [x \ \gamma \ \dot{x} \ \dot{\gamma}]^T$. Mientras que U es la corriente que entra al subsistema Brazo, x es el avance del carro en el brazo de la grúa y γ corresponde al bamboleo radial. Las matrices del espacio de estado correspondientes a este subsistema se muestran a continuación.

$$\mathcal{A}_J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1,7019 & 0 & 0 \\ 0 & -13,3301 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{B}_J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 18,2478 \\ 21,1299 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{C}_J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{D}_J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Se considera para los modelos presentados el tiempo de muestreo $T_s = 0.01[s]$. A continuación se describe el desarrollo de la experiencia.

2. Estrategia de control predictivo para la Torre

Para controlar la Torre de la grúa, se diseñará una estrategia de control predictivo basado en modelos. La función objetivo del controlador es la que se muestra a continuación:

$$\sum_{j=1}^{N_1} \lambda_1 (\theta(t+j) - r_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_1} \lambda_2 (\alpha(t+j) - r_2)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_u \Delta u(t+j-1)^2$$

$$s.a. -3 < \alpha < 3$$

Hint: Se recomienda el toolbox *Model Predictive Control. MATLAB.*

2. 1. Actividad 1

Diseñe un controlador predictivo basado en el modelo de la Torre. ¿Cuáles son los parámetros del controlador que puede manipular el diseñador?, ¿En qué afecta cada uno de ellos?

2. 2. Actividad 2

Implemente el controlador MPC, diseñado en la Actividad 1, para la Torre de la grúa del laboratorio. Considere las siguientes referencias para realizar las pruebas:

- $\theta = 60^\circ$
- $\theta = 90^\circ$

El objetivo de control es minimizar el tiempo de estabilización (considerar banda del 2%), sujeto a que la oscilación cumpla: $|\alpha| < 3^\circ$

2. 3. Actividad 3

Diseñe nuevamente el controlador, asignando una mayor importancia asociada a la oscilación de la carga cuando existen perturbaciones. Considere la siguiente referencia para realizar la prueba:

- $\theta = 0^\circ$ e introduzca el siguiente perfil de perturbación¹ a la carga presente en la grúa.

¹ El perfil de perturbación consiste en una entrada de 0.5[A] durante 0.5 segundos, luego -0.5[A] durante 0.5 segundos, para finalmente dejar oscilando durante 1 segundo antes de ejecutar cualquier acción de control. Este perfil se puede observar gráficamente en la Figura (3).

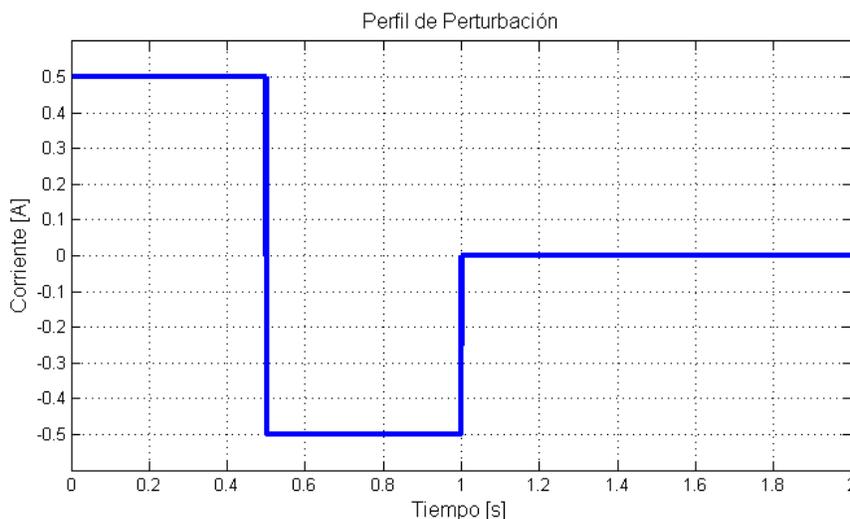


Figura 3: Perfil de perturbación para prueba de reducción de oscilaciones

El objetivo de control es minimizar el tiempo en que la oscilación (α) queda acotado por una banda de 3° y no vuelve a salir.

Comente las diferencias entre los controladores de las actividades 2 y 3. ¿Cuáles son los parámetros con mayor incidencia al intentar minimizar la oscilación de la carga?, ¿Y cuáles para la velocidad de convergencia?, ¿Cuál es el efecto de manipular el horizonte de predicción en el funcionamiento del sistema controlado?



3. Estrategia de control predictivo para el Brazo

Para controlar el Brazo de la grúa, se diseñará una estrategia de control predictivo basado en modelos. La función objetivo del controlador es la que se muestra a continuación:

$$\sum_{j=1}^{N_1} \lambda_1 (x(t+j) - r_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_1} \lambda_2 (\gamma(t+j) - r_2)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_u \Delta u(t+j-1)^2$$

s.a. $-6 < \gamma < 6$

3. 1. Actividad 1

Diseñe en un controlador predictivo basado en el modelo para el Brazo. ¿Cuáles son los parámetros del controlador que puede manipular el diseñador?, ¿En qué afecta cada uno de ellos?

3. 2. Actividad 2

Implemente el controlador MPC diseñado en la Actividad 1 para el Brazo de la grúa del laboratorio. Considere las siguientes referencias para realizar las pruebas:

- $x = 0,2[m]$
- $x = -0,2[m]$

El objetivo de control es minimizar el tiempo de estabilización (considerar banda del 2%), sujeto a que la oscilación cumpla: $|\gamma| < 6^\circ$

3. 3. Actividad 3

Diseñe nuevamente el controlador, considerando una mayor importancia asociada a la oscilación de la carga cuando existen perturbaciones. Considere la siguiente referencia para realizar la prueba:

- $x = 0[m]$ e introduzca perturbaciones¹ a la carga presente en la grúa.

El objetivo de control es minimizar el tiempo en que la oscilación (γ) queda acotado por una banda de 6° y no vuelve a salir.

Comente las diferencias entre los controladores de las actividades 2 y 3. ¿Cuales son los parámetros con mayor incidencia al intentar minimizar la oscilación de la carga?, ¿Y cuáles para la velocidad de convergencia?, ¿Cuál es el efecto de manipular el horizonte de predicción en el desempeño del controlador?



4. Controladores acoplados (Opcional: puntaje adicional)

Finalmente, para comprobar el funcionamiento conjunto de ambos subsistemas, se pide implementar ambos controladores predictivos en la grúa del laboratorio y realizar pruebas considerando las siguientes referencias:

- $\theta = 60^\circ$, $x = 0,2[m]$
- $\theta = 0^\circ$, $x = 0[m]$ e introduzca perturbaciones¹.

¿Cómo afectan las diferentes configuraciones de los parámetros en el desempeño del controlador? ¿En qué casos podría producirse un error al acoplar ambos controladores?