

Hacia una Mejor Explotación de Controladores Basados en Moldeo de Energía para Control de Posición de Aeropéndulo

Hanan Ronaldo Quispe Condori, Joel Huamán Zárate, Héctor Lionel García Hurtado, Roly Sandro Gutierrez Benito, María Teresa Vera Percca, Nicoll Alexandra Sotomayor Mamani

Resumen—Presentamos un análisis de posibles estrategias para explotar la capacidad de esquemas de control existentes basados en la metodología de moldeo de energía propuesta por Takegaki y Arimoto [cita]. En muchas aplicaciones, en especial el control de posición, es importante entender como obtener el mejor beneficio de los esquemas de control existentes. Nosotros realizamos experimentos usando 5 esquemas de control distintos usando un prototipo experimental de aeropéndulo. Nosotros tambien comparamos los resultados experimentales de cada esquema con los resultados obtenidos usando un modelo teorico del sistema.

I. INTRODUCCIÓN

Texto aca [?].

II. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Se utilizó el enfoque de dinámica analítica, este enfoque usa las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange para la obtención del modelo dinámico del sistema, se eligio este metodo debido a que se obtiene una estructura matemática bien definida el cual se integra de manera natural con la teoria de estabilidad de Lyapunov para el análisis de estabilidad para sistemas dinámicos lineales y no lineales sin importar el orden del sistema. [?]

Se obtendrá la cinemática directa del sistema en función de la posición angular q .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \sin(q) \\ -l_c \cos(q) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Apartir de 1 se podrá obtener la cinemática diferencial para calcular la rapidez lineal.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} l_c \cos(q) \\ \dot{\theta} l_c \sin(q) \end{bmatrix} \quad (2)$$

La rapidez lineal esta dada por

$$\|v\|^2 = v \cdot v^T = \sqrt{\dot{q}^2 l_c^2 \sin^2(q) + \dot{q}^2 l_c^2 \cos^2(q)}^2 \quad (3)$$

$$\|v\|^2 = l_c^2 \dot{q}^2$$

Usando la expresión de la rapidez lineal del sistema se procedera a calcular el modelo de energía del sistema.

$$\begin{aligned} \mathcal{K}(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m l_c^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} I \dot{q}^2 \\ \mathcal{U}(q) &= g m l_c [1 - \cos(q)] \end{aligned} \quad (4)$$

El lagrangiano del sistema esta dado por

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(q, \dot{q}) &= \mathcal{K}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q) \\ \mathcal{L}(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} [m l_c^2 \dot{q}^2 + I \dot{q}^2] - g m l_c [1 - \cos(q)] \end{aligned} \quad (5)$$

Las ecuaciones de Euler lagrange para el sistema tienen la siguiente forma

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} \right] + f_f(f_e, \dot{q}) = \tau \quad (6)$$

Considerando el lagrangiano se tienen las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] &= [m l_c^2 + I] \dot{q} \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] &= [m l_c^2 + I] \ddot{q} \\ \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} \right] &= -g m l_c \sin(q) \end{aligned} \quad (7)$$

El modelo dinámico del sub-sistema brazo-hélice considerando el fenomeno de fricción esta dado por:

$$[m l_c^2 + I] \ddot{q} + g m l_c \sin(q) + b \dot{q} = \tau_{ri} \quad (8)$$

Comunmente se considera que el torque de rotor τ_r es directamente proporcional al cuadrado de su velocidad rotacional ω_r^2 [?], [?], [?], [?], pero esto no considera la dinámica interna del rotor, ni las perdidas por fricción. En este estudio se hará uso del modelo LuGre para el modelamiento de la fricción del rotor ya que este es el modelo más completo reportado en la literatura [?]. Segun el modelo Lugre la estructura dinámica para el rotor esta dada por:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{ri} &= \omega_{ri} - \sigma_{0ri} \frac{|\omega_{ri}|}{\mu_{ri}(\omega_{ri})} z_{ri} \\ \tau_{f_{ri}} &= \sigma_{0ri} z_{ri} + \sigma_{1ri} \dot{z}_{ri} + f_{ri}(\omega_{ri}) \end{aligned} \quad (9)$$

Además $\mu_{ri}(\omega_{ri}) = \tau_{c_{ri}} + [\tau_{s_{ri}} - \tau_{c_{ri}}] e^{-|\frac{\omega_{ri}}{\omega_{s_{ri}}}|^2}$ es una función con la fricción de Coulomb y el efecto Stribeck. Donde

- \dot{z}_{ri} Micromovimientos con velocidad.
- $\tau_{f_{ri}}$ Torque de fricción en el rotor.
- σ_{0ri} Constante de rigidez de fricción de Lugre.
- σ_{1ri} Coeficiente de amortiguamiento asociado a \dot{z}_{ri} .
- $f_{ri}(\omega_{ri}) = b_{ri} \omega_{ri}$ Fricción viscosa.

- $\tau_{c_{ri}}$ Coeficiente de fricción de Coulomb.
- $\tau_{s_{ri}}$ Coeficiente de fricción estatico.
- $\omega_{s_{ri}}$ Constante de Stribeck.

Usando este modelo el modelo dinámico del rotor con hélice queda de la siguiente forma.

$$\tau_{ri} = I_{ri}\dot{\omega}_{ri} + \sigma_{0_{ri}}z_{ri} + \sigma_{1_{ri}}\dot{z}_{ri} + b_{ri}\omega_{ri} \quad (10)$$

Donde

- I_{ri} Momento de Inercia del rotor.
- τ_{ri} Torque aplicado (señal de control)

Finalmente el modelo dinámico del sistema estará dado por

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_q \\ z_{ri} \\ q \\ \dot{q} \\ \omega_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} - \sigma_{0_q} \left[\frac{|\dot{q}|}{\tau_{c_q} + [\tau_{s_q} - \tau_{c_q}]e^{-|\frac{\dot{q}}{\omega_{s_q}}|^2}} \right] z_q \\ \omega_{ri} - \sigma_{0_{ri}} \frac{|\omega_{ri}|}{\mu_{ri}(\omega_{ri})} z_{ri} \\ \dot{q} \\ \frac{1}{m l_c^2 + I} [\tau_{ri} - g m l_c \sin(q) - \sigma_{0_q} z_q - \sigma_{1_q} \dot{z}_q - b \dot{q}] \\ \frac{1}{I_{ri}} [\tau_{ri} - \sigma_{0_{ri}} z_{ri} - \sigma_{1_{ri}} \dot{z}_{ri} - b_{ri} \omega_{ri}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde

REFERENCIAS

- O. Gunnel and A. Ankarali, "Tuning pid controller using genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm for single propeller pendulum," *ICAME2017*, 2017.
- F. Reyes, *Drones: Cinemática, Dinámica y Control de Cuadricópteros*. Alfaomega grupo editor, 2019.
- A. Nemati and M. Kumar, "Modeling and control of a single axis tilting quadcopter," in *2014 American Control Conference*, pp. 3077–3082, IEEE, 2014.
- M. Schulz, F. Augugliaro, R. Ritz, and R. D'Andrea, "High-speed, steady flight with a quadcopter in a confined environment using a tether," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1279–1284, IEEE, 2015.
- A. Koehl, H. Rafaralahy, M. Boutayeb, and B. Martinez, "Aerodynamic modelling and experimental identification of a coaxial-rotor uav," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 68, no. 1, pp. 53–68, 2012.
- D. Mellinger, N. Michael, and V. Kumar, "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 5, pp. 664–674, 2012.