Control de un Robot planar de 2 GDL

América Morales.-César Cortés.-César Tolentino.-Mario Méndez.-
Fernando Coronado
Robótica y Manufactura Avanzada-CINVESTAV, Saltillo México.

***Abstract*— En este reporte se muestra diferentes tipos de controles en un robot de 2GDL de manera didáctica. Se presenta el modelo dinámico que representa el comportamiento del sistema mecánico tomando en cuenta la relación que existe entre las fuerzas actuando sobre los cuerpos, sus masas y sus movimientos.**

I. INTRODUCCIÓN

La automatización de los procesos de producción mediante el uso de manipuladores robóticos parece ser una de las áreas tecnológicas de mayor progreso en la última década, puesto que brinda la posibilidad de manipular objetos mediante una configuración versátil y automática de sistemas de manufactura. Un indicativo de cuan eficiente ha sido la robótica para el mejoramiento de los procesos de manufactura son los esfuerzos puestos en estas áreas.

El desarrollo de controladores efectivos representa un paso importante en el área de la robótica sobre todo cuando se trata de aplicaciones industriales en donde se requiere de una manipulación muy precisa.
En este trabajo se diseña un robot de 2gdl, donde se obtuvo el modelo dinámico, además de realizar el diseño de control que asegura la estabilidad del sistema, en el cual se mide la posición para obtener la diferencia del error entre el valor deseado y el valor real.

Se realizaron diversas leyes de control que permitieron comprobar el comportamiento del robot manipulador dependiendo de cada una de la leyes de control que se le aplican. Así mismo se realizó la simulación del modelo del robot en Matlab pasa así poder observar el comportamiento de éste con las diferentes leyes de control aplicadas.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del de los estudiantes de Robótica y Manufactura Avanzada del CINVESTAV Saltillo de la 3°Generación.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo del trabajo es el desarrollo del robot articulado de dos grados de libertad, obteniendo la dinámica y el control adecuado para el correcto desempeño del robot.

El proyecto se ataca en 3 fases:

1. Obtención de datos de diseño (masas y longitudes)

2. Simulaciones en MATLAB del modelo con los controles a lazo cerrado

3. Control en tiempo real

Teniendo como finalidad:

a Hacer el diseño mecánico de un robot de 2 gdl.

b Diseñar e implementar los controles: PI, P, PD, PID, Gain Scheduling, FeedBack Linearization.

c Realizar la integración de los dispositivos electrónicos y mecánico para el funcionamiento físico.

d Realizar pruebas experimentales asi como la operación en tiempo real

III. MODELADO DEL SISTEMA

Típicamente los robots están constituidos por un conjunto de cuerpos denominados eslabones, los cuales se encuentran conectados por articulaciones, formando así una cadena que se encuentra sujeta a un sistema coordenado fijo. Cada articulación posee un grado de libertad que puede ser rotacional o prismático.

III-A. Dinámica

El modelo dinámico se puede establecer como la relación matemática entre:
-Las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones.
-Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masas e inercias de sus elementos.

La importancia de este análisis radica en la posibilidad de obtener un modelo del manipulador que es de gran utilidad en distintos aspectos, como determinar el comportamiento del sistema por medio de simulaciones.

III-A.1. Euler Lagrange: Para la obtención del modelo dinámico se implementó la formulación de Euler-Lagrange la cual define al lagrangiano como la diferencia entre la energía cinética K y potencial P

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{U} \tag{1}$$

La formulación lagrangiana establece la ecuación, que se usa para obtener la ecuación dinámica de sistemas sujetos a las leyes de Newton:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \tau \tag{2}$$

Donde q y $\dot{q}$ son las coordenadas generalizadas y la derivada de las coordenadas generalizadas respectivamente. Considérese un robot de n grados de libertad, formado por eslabones rígidos con uniones libres de fricción y elasticidad. Partiendo de que la energía cinética de un cuerpo rígido está dada por:

$$K = \frac{1}{2}(mv^T v + w^T I w) \tag{3}$$

Donde m es la masa del objeto,v y w son los vectores de velocidades lineal y angular respectivamente e I es el tensor de inercia.

Con lo anterior podemos formar la ecuación dinámica del robot, que se define más adelante, así y como los elementos que la conforman.

A) Ecuación dinámica del robot

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \tag{4}$$

B) Cálculo de la matriz de Inercia

$$H(q) = \sum_{i=1}^{n}(m_i J_{v_i}^T J_{v_i} + J_{w_i}^T R_i^0 I_i R_i^{0^T} J_{w_i}) \tag{5}$$

C) Cálculo del vector de gravedad

$$G(q) = \sum_{i=1}^{n}(J_{v_i}^T m_i \vec{g}) \tag{6}$$

Donde $\vec{g} = [0g0]$, $g = 9{,}81 m/s^2$, pero es necesario hacer notar que la gravedad tiene efecto según se defina el vector $\vec{g}$, ya que puede cambiar de acuerdo con la posición en la que se coloque el robot. Se debe hacer el cálculo de acuerdo a la forma en que el robot se fije en su base.

IV. SISTEMA DE CONTROL

El problema de control para sistemas dinámicos consiste en determinar la secuencia de entradas articulares necesarias para producir que el dispositivo ejecute un movimiento deseado. Las entradas articulares pueden ser fuerzas, torques, o bien entradas a actuadores, como voltajes de entrada para motores.
En un sistema de control en lazo cerrado, el controlador se alimenta con la señal de error de actuación, correspondiente a la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

IV-A. Acción Proporcional

Consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango.

Sin embargo, existe también un valor límite en la constante proporcional a partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados. Este fenómeno se llama sobreoscilación y, por razones de seguridad, no debe sobrepasar el 30 %, aunque es conveniente que la parte proporcional ni siquiera produzca sobreoscilación. Hay una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control.
La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral derivativa.

La fórmula del proporcional esta dada por:

$$P_{sal} = k_p e(t) \tag{7}$$

IV-B. *Acción Integral*

El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; Luego es multiplicado por una constante k_i que representa la constante de integración. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario. La fórmula de la acción integral está dada por:

$$I_{sal} = K_i \int_T^0 e(\tau) d\tau \tag{8}$$

IV-C. *Acción Derivativa*

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente. Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante D y luego se suma a las señales anteriores (P+I).
Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder adecuadamente. La fórmula del derivativo está dada por:

$$D_{sal} = k_d \frac{de}{dt} \tag{9}$$

IV-D. *Control PID*

Con el control PD podemos alcanzar la posición deseada en robots que no contienen el término gravitacional ($g(q_d) \neq 0$). En este caso el proceso de sintonización para un control PD puede ser trivial, ya que basta con seleccionar un diseño de las matrices K_p y K_v de tal manera que estas sean simétricas y positivas definidas.

En el caso donde el modelo del robot contiene el vector de pares gravitacionales ($g(q) \neq 0$) y si en particular, $g(q_d) \neq 0$, donde q_d es la posición deseada de la articulación, entonces el objetivo del control de posición no puede ser alcanzado por el uso de una simple ley de control PD.

Un problema que puede presentarse es que el error de posición $\tilde{q}$ tiende a ser un vector constante, pero que siempre es diferente del vector $0 \in \mathbb{R}^n$.Entonces, desde un punto de vista de control automático y con la necesidad de satisfacer el objetivo de control de posición, es buena opción agregar un componente integral a la ley de control PD para llevar el error de posición a cero. Este punto de vista justifica la aplicación del control PID en robots. La ley de control PID está dada por:

$$\tau = K_p\tilde{q} + K_v\tilde{q} + K_i \int_0^t \tilde{q}(\sigma) d\sigma \tag{10}$$

Donde el diseño de las matrices $K_p, K_v, K_i \in \mathbb{R}^{n\times n}$ llamadas ganancias de posición, velocidad e integración, respectivamente, son simétricas y positivas definidas.

IV-E. Feedback linearization

Este tipo de controlador puede implementarse utilizando cualquiera de los ya mencionados anteriormente. La diferencia es que en Feedback linearization dentro del controlador se incluye la parte dinámica del sistema o las no linealidades para que al retroalimentarse en el sistema se eliminen. Para este caso se implementó mediante un PID y variando la referencia.

V. SINTONIZACIÓN DE GANANCIAS

A el proceso de selección de los mejores valores de ganancias para un controlador se le llama sintonización. Existen diferentes métodos para la sintonización de las ganancias de los controladores, algunos de estos son criterios de Zeigler, Nichols, sintonización difusa, procesos heurísticos, entre otras, las cuales se basan ya sea en parámetros específicos del sistema o parámetros específicos de la respuesta de los sistemas, estos basados ya sea en modelo, modelo en espacio de estado, gráficas o curvas de reacción de sistemas.

En este documento se plantean dos de los procedimientos para la sintonización de las ganancias. El primero es el planteado en el diseño de controladores con saturación, este consiste en los siguientes pasos:

1) Se propone una K_i (constante de integración) como una matriz diagonal tal que sus elementos satisfagan que $k_{i_i} > 0$, para $i = 1, \ldots, n$

2) Calcular K_p (constante de proporcionalidad) como una matriz diagonal en la cual estos elementos cumplan con que

$$K_{p_i} \sum_{j=1}^{n} max_q \left| \frac{\partial g_i(q)}{\partial q_j} \right|, \ i = 1, \ldots, n$$

3) Escoger k_d (constante derivativa) como una matriz diagonal cuyos elementos cumplan con que $K_{d_i} > \frac{K_{i_i}}{\sum_{j=1}^{n} \left| \frac{\partial g_i(q)}{\partial q_j} \right|} \sum_{j=1}^{n} \max_q |M_{ij}(q)|$

Con estas ganancias se puede estimar el dominio de atracción de la zona en la que se encuentran los puntos de equilibrio del sistema. Otro método para la sintonización de las ganancias es linealizar el sistema que se esta analizando para llevarlo a la forma general de los sistemas lineales en espacio de estados:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Después se plantea la estrategia de control y se escribe la ecuación anterior a lazo cerrado, lo cual nos queda de la siguiente forma:

$$\dot{x} = (A - BK)x$$

Esto suponiendo que el control es Kx, y por último se escogen las ganancias de manera que la matriz $(A-BK)$ sea Hurwitz, esto es que todos sus valores propios sean negativos, esto en sistemas de control significa que todos los polos están en el semiplano izquierdo, por lo tanto son estables. Para la sintonización de los controles aplicados en este documento de utilizó el último método, por supuesto con ayuda de Matlab, ya que los cálculos son bastante complejos y con el software se simplifican. Por lo mismo no se plantean en este documento 1.

VI. RESULTADOS

VI-A. Control Proporcional

Como se puede ver en este tipo de control (fig. 1) no se logra estabilizar el sistema en una posición deseada, ya que el error oscila entre su punto de equilibrio, por lo que también los requerimientos del torque son grandes (fig 2).

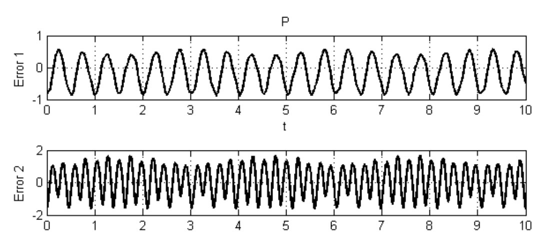

Fig. 1. Error de Posición P

VI-B. Control PID

En este control se observa que logra la posición deseada de forma estable y el error se hace 0. Las gráficas de torque dependen de la sintonización de las ganancias para este converja a la posición deseada lo mas rápido posible.

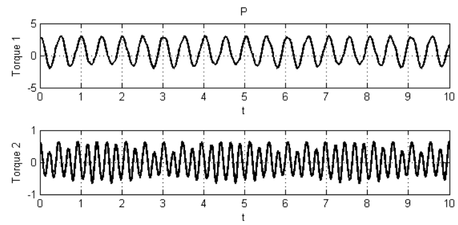

Fig. 2. Gráfica de Torque de Control P

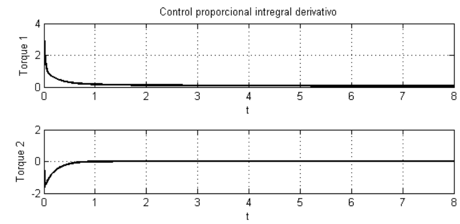

Fig. 4. Gráfica de Torque de Control PID

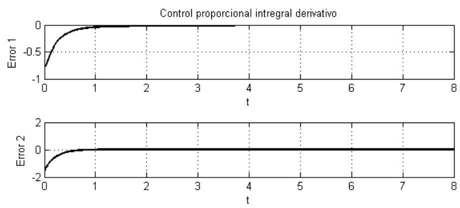

Fig. 3. Error de Posición PID

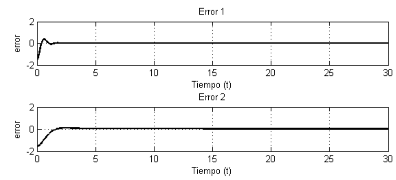

Fig. 5. Error del Feedback Linearization

VI-C. Control Feedback Linearization

Este control presenta un buen desempeño ya que cancela las no linealidades que presenta el sistema, converge rápidamente a sus posición deseada y sus requerimentos energéticos son un poco altos.

VII. IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PID EN TIEMPO REAL

En la práctica el control PID, es uno de los controles más utilizados, por su eficiencia y por la acción integral elimina el error que se genera por el estado estacionario, en esta sección se implementó el control PID a un motor Maxon EC-22 con un reductor GP-22c de la compañia Maxon Motor utilizando como software de comunicación MatLab.
Se pudo observar en experimento que el control cumple con las expectativas, ya que alcanza su posición deseada, el error es insignificante y los requerimentos energéticos son minimos comparados con otros tipos de contoles.

VIII. CONCLUSIONES

Se pudo observar el desempeño de los diferentes tipos de controles, obteniendo como resultado que el control proporcional no tiene un buen desempeño dado que es inestable en el punto deseado que se pretende alcanzar.

Se considera que el control PID es el control indicado para un robot de dos grados de libertad ya que con la parte proporcional y derivativa se obtiene buena regulación y la parte integral minimiza errores que puedan existir.

El control Feedback Linearization tiene un buen desempeño en cuestión de simulación y análisis, dado que elimina las no linearidades del sistema. En la vida real para conocer el modelo exacto de un sistema es muy complejo, por lo que este control tendría problemas en la regulación o seguimiento de una trayectoria.

IX. TRABAJO FUTURO

Se construirá el robot de 2 grados de libertad implementando los controles simulados en documento.

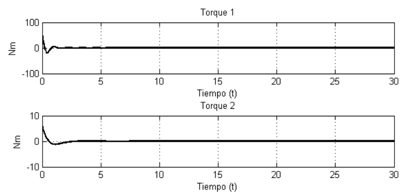

Fig. 6. Gráfica de Torques del Feedback Linearizaction

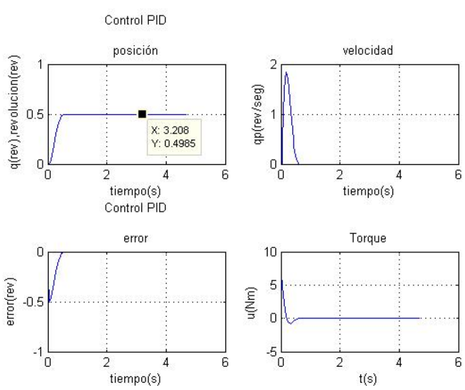

Fig. 7. Gráfica de Torque de Control PID en tiempo real