

## Identificación de holgura en sistemas de transmisión mecánica por medio de observador de perturbaciones

César Orozco Lechuga<sup>1</sup>, Manuel Nandayapa Alfaro<sup>1</sup> Osslan Osiris Vergara Villegas<sup>1</sup>,  
Ángel Flores Abad<sup>1</sup>, Raúl Neco Caberta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

### Resumen

EL diseño de robots manipuladores es una etapa que ha traído ventajas y desarrollo a la industria. Debido a que los manipuladores pueden ser programados para realizar diversas tareas repetitivas de forma automática. Además, los robots son aptos para operar en ambientes donde los humanos no tienen la capacidad. Una de las partes fundamentales en el diseño de robots es el diseño mecánico. De aquí, algunas de las características que se evalúan son: la precisión de sus movimientos, la capacidad de realizar tareas con ciertos grados de dificultad, el área de trabajo del robot, el volumen que puede alcanzar dentro de su área de trabajo, la potencia y la energía requerida, todo esto evaluado en ambientes físicos y modelos matemáticos. Existen diversos tipos de transmisiones mecánicas que se utilizan para transmitir el movimiento de los eslabones de un manipulador industrial. Estos movimientos se deben realizar con la precisión, velocidad, aceleración y fuerza adecuada, para posicionarse en el punto indicado y realizar las tareas para las cuales fueron diseñados. Debido a esta necesidad, el estudio que a continuación se muestra es en relación a la medición de holgura que se presenta entre los dientes de un tren de engranes. La holgura que presentan los sistemas de transmisión mecánica afecta la precisión de estos sistemas. El desarrollo de este estudio se llevó a cabo utilizando un observador de perturbaciones DOB y un control utilizando las leyes de Newton.

**Palabras clave:** Tren de engranes, observador de perturbaciones DOB.

### Introducción

Hoy en día manipuladores se han convertido en un tema de interés atractivo en varias aplicaciones, tales como máquinas herramientas, simuladores de movimientos, micro robots, dispositivos médicos y sensores físicos. Lo anterior es debido a sus ventajas intrínsecas en los factores de carga

útil, rigidez, precisión, velocidad y aceleración operativa. Por esta razón el estudio de la holgura es de importancia relevante y se identifica como la separación que existe entre engranes de sistemas de transmisión de movimiento y de fuerza como se muestra en la figura 1.

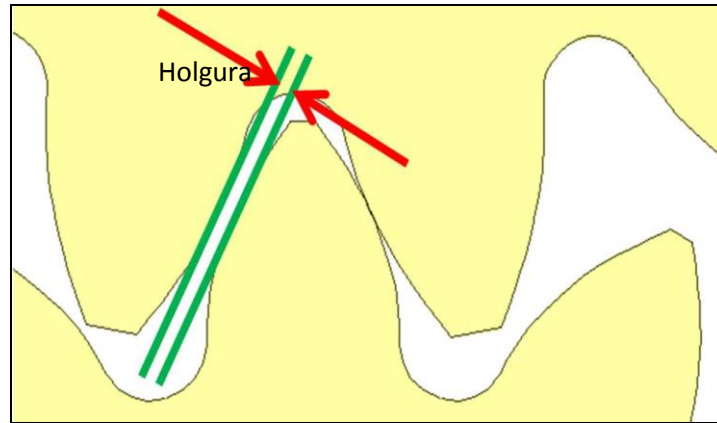


Figura 1. Holgura que se presenta entre los dientes de un tren de engranes

## Antecedentes

Los últimos estudios realizados a este fenómeno de la holgura son los de Parasanga et al. (2013) donde utilizaron las matrices de traslación para el seguimiento del movimiento y aplicó las leyes de Newton (acción y reacción). Además se implementó un DOB para estimar las perturbaciones en la fuerza.

Varias formas se han utilizado para evaluar los manipuladores como es el caso de Aghili et al. (2006) que desarrollaron y diseñaron un banco de pruebas mecatrónico, donde se aplicó modelos de cinemática inversa que permitió una alta fidelidad y pruebas a bajo costo, de prototipos de eslabones para manipuladores en un entorno altamente flexible. El sistema de banco de pruebas consistió en un conjunto de motores de carga cuyos ejes estaban conectados a los de los prototipos a través de algunos transductores de par. Un controlador para modificar la dinámica de los motores de carga y lograr que coincidieran con la dinámica no lineal y los eslabones de un manipulador. Lo cual fue

posible mediante la incorporación de la medición de los ángulos de las articulaciones, velocidades y par de las articulaciones, así como el modelo dinámico de los eslabones del manipulador, en un bucle de alimentación hacia delante y otro de retroalimentación compuesta. El sistema del banco de pruebas hizo posible el análisis térmico en el vacío con el fin de simular un entorno hostil semejante al espacio. Por último, se demostró el rendimiento de la carga de emulador experimentalmente comparando las trayectorias de las posiciones comunes, velocidades y par motor de una serie de prototipos de eslabones que se instalaron por primera vez en un robot real y en el dinamómetro. Los resultados experimentales mostraron una buena concordancia entre las respuestas para validar el sistema de emulación.

Otro desarrollo fue el de Haider et al. (2007), un sistema mecánico a base de dos motores para eliminar la holgura en el sistema de transmisión de movimiento. El diseño consistió de dos motores que

operaran en un solo sentido para alimentar el sistema mecánico, solo que estos motores trabajaron en sentido contrario uno del otro. El modelo de control utilizado fue un control derivativo y las pruebas se realizaron con los software: Pro Engineer Wilfirw 2.0, Visual Nastran 2004 y Matlab 6.5 para comprobar su efectividad. Por otro lado, Mokhtari et al. (2006) realizaron el diseño de un algoritmo para observar el comportamiento del motor de imanes permanentes cuando se presenta la holgura del mecanismo de transmisión. La simulación del algoritmo de control fue realizada en SIMULINK MATLAB. En la simulación se obtuvieron las gráficas de señal de error en función del tiempo y la posición de la carga en grados en función del tiempo para comprobar su funcionamiento.

La investigación de Nordin et al. (2000) fue presentar un análisis de las

diversas formas en las cuales se ha tratado de estudiar el problema de la holgura. Una evaluación de estos estudios realizados fue utilizando estrategias de modelos de control lineales utilizando sistemas dos masas. Las masas correspondían al motor y la carga para realizar la identificación de la holgura.

Campos et al. (2000) trabajaron en un modelo de dinámica inversa en un tiempo discreto para un sistema de control. Todo esto, con el enfoque de predecir holgura entre engranes de mecanismos de precisión. Utilizaron un bucle de control PD por medio de redes neuronales adaptadas en el circuito de alimentación directa, para la inversión dinámica de la no linealidad del contragolpe entre los engranes. Con el mismo control predijo y compensó la holgura de los sistemas de transmisión mecánicos.

## Modelo de Prueba

Para controlar el sistema se utilizó la tarjeta programable Cyclone III EP3C16F484. La tarjeta contiene un FPGA que opera con 3.3V de corriente directa en sus entradas y salidas. Para integrar el decodificador y el puente H con la FPGA fue necesario un el diseño de un circuito. El circuito diseñado para el acoplamiento de señales consta de un circuito integrado HD74LS05P, que es un inversor.

En la parte de adquisición de datos para el codificador incremental. Las señales del canal A y B que son de 5V se conectan a un circuito acondicionador de señal. El

acondicionamiento de señal tiene el objetivo de cambiar el voltaje de 5 V a 3.3V. En la figura 2 se muestra el circuito utilizado para las señales de codificador incremental y el FPGA.

Para realizar el modelo físico para la adquisición de datos se utilizaron dos codificadores ópticos incrementales con una resolución de 1024 pulsos por revolución de la marca YUMBO modelo E6B2-CWZ3E, un motor de corriente directa de la marca H.T Drive modelo RH-11-3002 como se muestra en la figura 3.

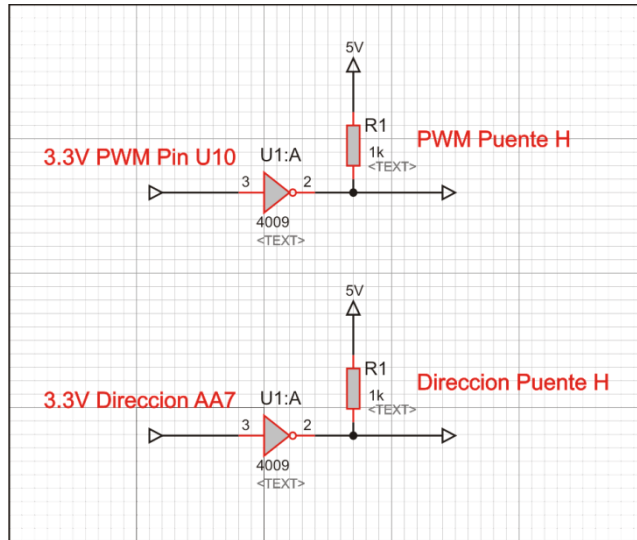


Figura 2. Circuito de acoplamiento de señales del codificador incremental y el FPGA

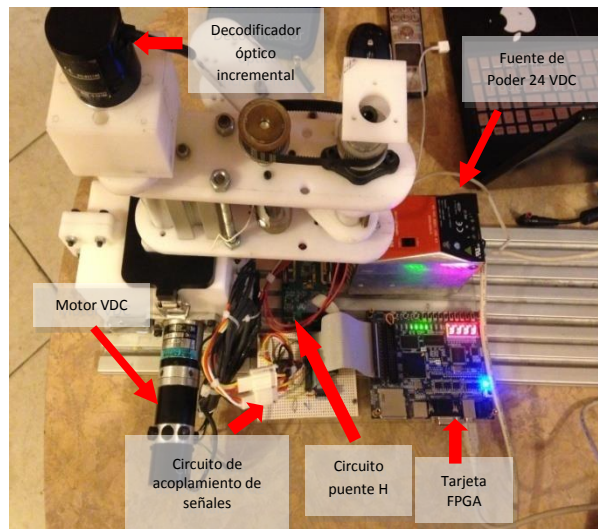


Figura 3. Robot híbrido con articulación con transmisión de engranes

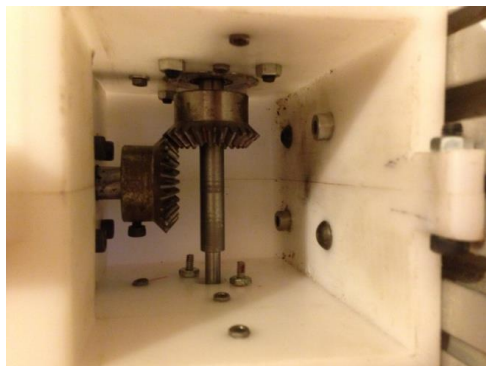


Figura 4. Tren de engranes donde se realizaron los estudios de holgura.

## Modelo Matemático del Servomotor

La fuerza del motor es calculada usando la ecuación  $f = kt * I$ , donde  $kt$  es la constante de fuerza del servomotor. Utilizando la segunda ley de Newton a partir de la fuerza se determina la posición lineal alcanzada por el servomotor, se despeja la aceleración de la ecuación 1.

$$a = \frac{f}{m} \quad (1)$$

donde:

$a = \text{aceleración}$

$m = \text{masa}$

Se utilizó la doble integral de la aceleración para determinar la posición lineal del servomotor, la posición del servomotor se puede obtener por medio del codificador incremental del servomotor.

$$a = \frac{dx^2}{t} \quad (2)$$

$$\iint \frac{dx^2}{dt} = \iint \frac{f}{m} \frac{dx^2}{dt} \quad (3)$$

Donde:

$x = \text{Posición}$

### Modelo Matemático del Observador

El modelo matemático del observador se puede expresar como se muestra en la ecuación 4.

$$f_{dis} = ktI + g \frac{xg}{s+g} - xg - \frac{xg}{s+g} - xg \quad (4)$$

donde:

$kt$

= constante de fuerza del servomotor

$I = \text{corriente electrica}$

### Diseño de la simulación de la planta con el observador de perturbaciones

Se construyó el diagrama de bloques de la planta utilizando la ecuación 1, el diagrama de bloques se muestra en la figura 5.

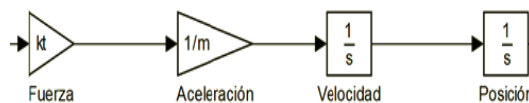


Figura 5. Modelo de control de bloques en Simulink

Se utilizó la ecuación 4 para el diagrama de bloques del observador como se muestra en la figura 6.

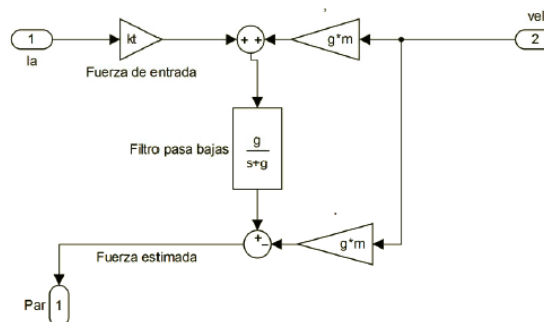


Figura 6. Modelo de control de bloques en Simulink

Control de velocidad y fuerza

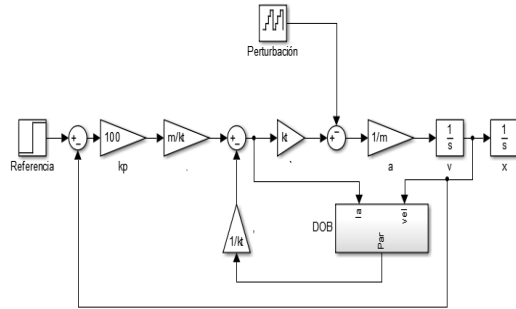


Figura 7. Modelo de control de bloques en Simulink.

## Resultados

En la siguiente tabla se muestran los datos de los valores nominales de placa del motor y de los decodificadores ópticos utilizados.

Descripción	Valores
Codificador Óptico	1024 pulsos por radian
Inercia del motor	43 $kgm^2$
Corriente del Motor	4.91 $Nm/l$

Para realizar la adquisición de los datos se utilizaron ciclos de muestreo de 25 microsegundos. El total del tiempo de adquisición de datos fue de 0.2 segundos en los cuales se adquirieron 8000 datos de la posición de ambos decodificadores en los cuales se muestra el cambio de posición y también podemos apreciar el atraso del movimiento de uno con respecto al otro. Figuras 8 y 9

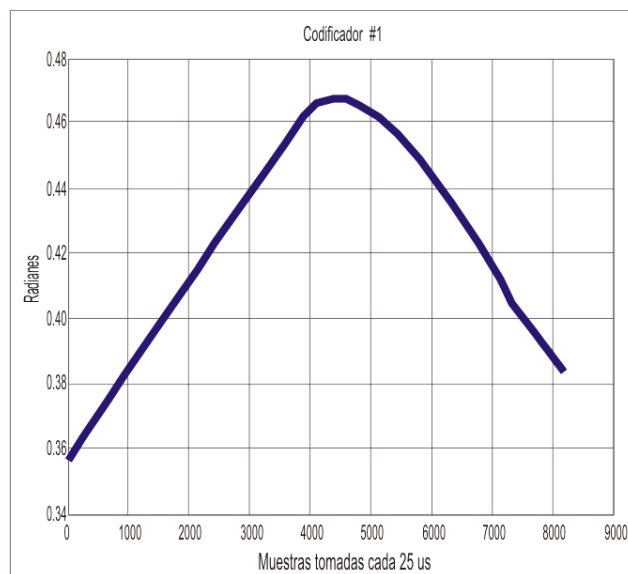


Figura 8. Codificador # 1

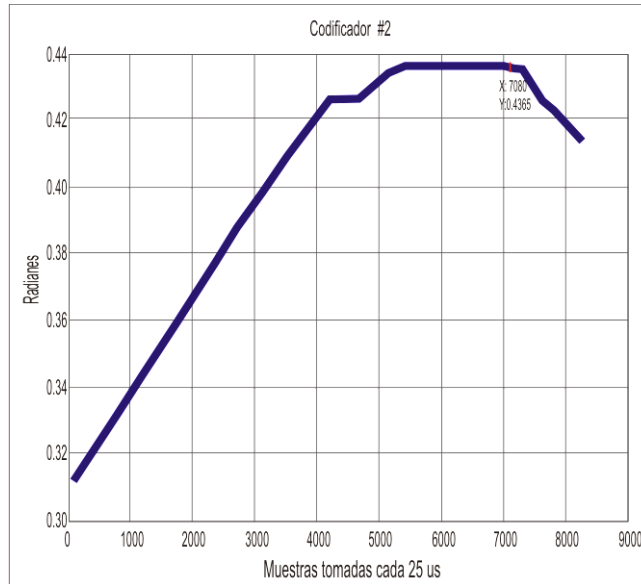


Figura 9. Codificador # 2

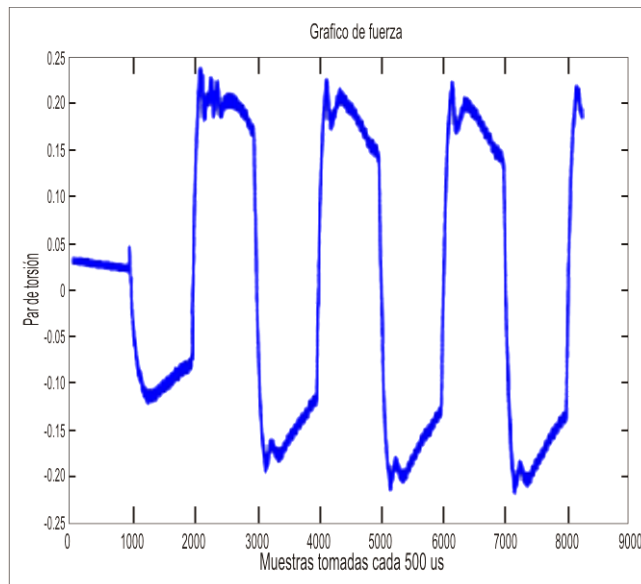


Figura 10. Estimación de fuerza.

## Conclusiones

Se llegó a la conclusión de que por medio de un observador de perturbaciones se puede identificar la holgura en cualquier sistema mecánico de transmisión. De los resultados obtenidos se pudo observar que el sistema

presenta perturbaciones al momento de que el manipulador cambia de dirección y se comporta de forma no lineal, estas condiciones están relacionadas directamente con la holgura del sistema mecánico de

transmisión. Con la medición de estas perturbaciones el sistema puede ser capaz de

compensar la holgura.

## Referencias

Aghili, F. (2006). A Mechatronic Testbed for Revolute-Joint Prototypes of a Manipulator. *Transactions on robotics*, 22, 1265-1273, doi: 10.1109/TRO.2006.882962

Bogiatzidis, I. X., Safacas, A. N., & Mitronikas, E. D. (2013). Detection of backlash phenomena appearing in a single cement kiln drive using the current and the electromagnetic torque signature. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60(8), 3441-3453

Campos, J., Lewis, F. L., & Selmic, R. (2000). Backlash compensation with filtered prediction in discrete time nonlinear systems by dynamic inversion using neural networks. In *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on* (Vol. 4, pp. 3534-3540). IEEE

Haider, Z., Habib, F., Mukhtar, M. H., & Munawar, K. (2007, October). Design, control and implementation of 2-DOF motion tracking platform using drive-anti drive mechanism for compensation of backlash. In *Robotic and Sensors Environments, 2007. ROSE 2007. International Workshop on* (pp. 1-6). IEEE.

Huang, T. Li, M. Zhao, X. Mei, J. Chetwynd D. y Hu, S. (2005). Conceptual Design and Dimensional Synthesis for a 3-DOF Module of the TriVariant—A Novel 5-DOF Reconfigurable Hybrid Robot. *Transactions on robotics*, 21, 449-456. doi:10.1109/TRO.2004.840908

Liyanage, M. H., Krouglicof, N., & Gosine, R. (2011, May). Development and testing of a novel high speed SCARA type manipulator for robotic applications. In *Robotics and Automation (ICRA)*,

2011 IEEE International Conference on (pp. 3236-3242). IEEE.

Mokhtari, H., & Barati, F. (2006, July). A new scheme for a mechanical load position control driven by a permanent magnet DC motor and a nonzero backlash gearbox. In *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* (Vol. 3, pp. 2052-2057). IEEE.

Nordin, M., & Gutman, P. O. (2002). Controlling mechanical systems with backlash—a survey. *Automatica*, 38(10), 1633-1649.

Okano, M. Tsurumoto, K. Togo, S. Tamada, N. y Fuchino, S. (2002). Characteristics of the Magnetic Gear Using a Bulk High-Tc Superconductor. *Transaction on applied superconductivity*, 12(1), 979-983. doi: 10.1109/TASC.2002.1018564

Park, K., Park, K., & Kim, D. (2008, April). Design of dual arm robot manipulator for precision assembly of mechanical parts. In *Smart Manufacturing Application, 2008. ICSMA 2008. International Conference on* (pp. 424-427). IEEE.

Sheng, L. Yiqing, W. Qingwei C. y Weili, H. (2006). A new Geometrical Method for the Inverse Kinematics of the Hyper-Redundant Manipulators, *Robotics and Biomimetics, ROBIO '06. IEEE International Conference* p. 1356-1359 doi: 10.1109/ROBIO.2006.340126

Varalakshmi, K. V., & Srinivas, J. (2012). Stiffness Metrics for Design of 3-RRR Flexible Manipulator. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2, 2021-2027