



Sistema multi-robot de manipuladores industriales coordinados por acoplamientos dinámicos de segundo orden Multi-robot system of industrial manipulators coordinated by second-order dynamic couplings

R. Vargas-Belman ^{a,*}, A. Rodríguez-Angeles ¹

^aDepartamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CDMX

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema coordinado conformado por dos robots industriales de la marca ABB equipados con sensores de fuerza. Sistema cuya función es la sujeción y manipulación de objetos utilizando un contacto puntual. Al ser un sistema coordinado ambos robots tienen acceso a toda la información de su fuerza aplicada, ruta deseada del objeto y posición del efector final del otro robot, a diferencia de un sistema maestro-esclavo donde solamente uno posee la información. Se implementan tres esquemas de control: control de fuerza-par, el cual permite regular la penetración generada por el contacto en el objeto, el otro un control de posición del objeto, el cual tiene como función cambiar la referencia de fuerza para que con este diferencial se produzca la manipulación del objeto, y un control por acoplamiento, cuya función es aumentar o disminuir la referencia de fuerza, para que los efectores finales siempre se encuentren a la misma distancia (desde ahora denominada distancia de agarre) y se asegure un agarre estable del objeto. Se presentan pruebas experimentales de dos tipos: el primero siendo el sistema sin el control por acoplamiento para ver la variación de la distancia de agarre y como fluctúa al momento de realizar el movimiento horizontal del objeto. Y el segundo, el sistema totalmente integrado donde se comprueba si el control disminuye esa fluctuación y se logra mantener constante la distancia de agarre.

Palabras Clave: Sistema coordinado, sistema multi-robot, robot industrial, control por acoplamiento, control de fuerza, manipulación

Abstract

This work presents the development of a coordinated system consisting of two ABB industrial robots equipped with force sensors. The function of this system is the gripping and manipulation of objects using a point contact. Being a coordinated system, both robots have access to all the information of their applied force, desired path of the object and position of the end effector of the other robot, unlike a master-slave system where only one robot has the information. Three control schemes are implemented: force-torque control, which allows regulating the penetration generated by the contact on the object, the other one an object position control, whose function is to change the force reference so that with this differential the object manipulation is produced, and a coupling control, whose function is to increase or decrease the force reference, so that the end effectors are always at the same distance (from now on called gripping distance) and a stable grip of the object is ensured. Experimental tests of two types are presented: the first one being the system without the coupling control to see the variation of the grip distance and how it fluctuates at the moment of the horizontal movement of the object. And the second one, the fully integrated system where it is tested if the control decreases this fluctuation and the grip distance is kept constant.

Keywords: Coordinated system, multi-robot system, industrial robot, docking control, force control, manipulation

*Autor para correspondencia: rodrigo.vargas@cinvestav.mx

Correo electrónico: rodrigo.vargas@cinvestav.mx (Rodrigo Vargas-Belman), aangeles@cinvestav.mx (Alejandro Rodríguez-Angeles)

Historial del manuscrito: recibido el 04/11/2022, última versión-revisada recibida el 04/11/2022, aceptado el 07/11/2022, publicado el 11/11/2022. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial5.10188>



1. Introducción

Los sistemas robóticos deben de ser complementados con diferentes tipos de sensores para facilitar la obtención de información. Estos dispositivos se caracterizan por dar a los robots las habilidades de detectar objetos a distancia, por el sonido, por el olor o incluso por la temperatura. Los sensores permiten que los robots puedan recibir y emitir información de todo aquello que les rodea. Sin estos dispositivos no podrían moverse ni interactuar con los objetos, con las personas o con otros robots.

Los sensores de fuerza, son necesarios para que el robot conozca el impacto que tiene su interacción con el objeto que esta manipulando, siendo esta de vital importancia cuando hablamos de sujeción o agarre de piezas, para evitar deformaciones no deseadas, daño a acabados superficiales, etc. o en su defecto para que este no pueda soltarlo.

Si bien, un robot con los sensores adecuados posee diversas aplicaciones en la industria, en ocasiones no es suficiente para realizar tareas más complejas, ya que necesitan más de un robot. Por este motivo se consideran sistemas coordinados, donde los robots puedan comunicarse entre si para evitar contactos no deseados, realizar actividades en tiempos iguales o modificar su propio comportamiento debido a la interacción entre ellos. Los sistemas coordinados poseen múltiples ventajas, gracias al procesamiento independiente de cada uno de los miembros del sistema se permite abordar tareas de manera más rápida y eficiente que si lo hicieran de forma individual, tolerando errores o pérdidas en alguno de sus miembros.

El presente trabajo se enfoca en un sistema coordinado de dos robots industriales ABB IRB2400 de arquitectura cerrada, es decir, no se tiene acceso directo a sus sistemas de control ni a la señales que transmiten a los actuadores, por lo que solamente se puede controlar la posición en el espacio de trabajo a través de su propio software, RobotStudio. Implementando como efectores finales dos sensores de fuerza de marcas JR3 y ATI, con una adaptación de contacto puntual, siendo estos conectados a una computadora, la cual será encargada de la comunicación entre los sensores y los robots, recibiendo y distribuyendo datos constantemente, implementando en esta la lógica de semáforos para que el sistema este efectivamente sincronizado. Agregando esquema de control híbrido de fuerza-posición, un control por acoplamiento dinámico de segundo orden para coordinar el movimiento de ambos robots.

2. Modelos Matemáticos

Para describir el proceso de agarre-manipulación a través de dos robots coordinados por medio de un contacto puntual, se deben de establecer las relaciones entre el movimiento del robot y el efecto que este tendrá sobre el objeto, así como las reacciones que este causará sobre los mismos robots, es por esto que a continuación se presentan los modelos dinámicos para el proceso de agarre-manipulación.

2.1. Modelo del Ambiente

Para modelar las reacciones que tendrá el objeto sobre el robot debido a la interacción con este, se utiliza el modelo de

impedancia, el cual consiste en utilizar la dinámica de un sistema masa-resorte-amortiguador para obtener fuerzas de reacción Hogan (1985), denominando desde ahora al objeto como el ambiente de trabajo. Para un caso general el ambiente de trabajo puede ser modelado por (1).

$$F_r = M_A(\ddot{X}_R - \ddot{X}_A) + B_A(\dot{X}_R - \dot{X}_A) + K_A(X_R - X_A) \quad (1)$$

Donde M_A , B_A y $K_A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del ambiente respectivamente; F_r , X_R , $X_A \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, son los vectores de fuerza, vector de posición del efector final y de contacto del objeto respectivamente. Simplificando dicho modelo al tomar en cuenta un ambiente puramente capacitivo como se muestra en (2).

$$F_r = K_A \Delta X \quad (2)$$

A semejando al comportamiento de un resorte, con ΔX como la penetración realizada en el ambiente.

2.2. Modelo del Robot Manipulador

Se consideran los modelos cinemático y dinámico.

2.2.1. Modelo cinemático

El modelo cinemático de un robot manipulador esta dado por tres análisis.

- Modelo cinemático directo.-Permite determinar la posición y orientación del efector final X_R en el espacio de trabajo respecto de las posiciones en el espacio articular $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, donde n son los grados de libertad del manipulador. Por lo que se tiene que $X_R = fcn_{di}(q)$.
- Modelo cinemático inverso.-Permite determinar las posiciones en el espacio articular respecto de la posición y orientación del efector final en el espacio de trabajo, dando $q = fcn_{in}(X_R)$.
- Modelo cinemático diferencial.-Permite establecer una relación entre las velocidades traslacionales v y rotacionales ω del efector final con respecto a las velocidades articulares. Así como, describir la relación entre las fuerzas F y momentos generados M por este en el ambiente respecto de las reacciones generadas en las articulaciones τ_A . Realizando la relación con el Jacobiano $J(q)$, por lo que obtenemos las relaciones descritas en (3).

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q} \quad \tau_A = J(q)^T \begin{bmatrix} f \\ M \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2.2. Modelo dinámico

El modelo dinámico de un robot manipulador esta dado por dos análisis.

- Modelo de movimiento libre.-Se considera libre cuando el efector final de robot no esta en contacto con ningun ambiente, es decir, las fuerzas ejercidas de reacción en este son cero, siendo el modelo dinámico presentado en (4). Donde $D(q)$ y $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercias, y la matriz de Coriolis respectivamente; $G(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de efecto gravitacional y $\tau_c \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ el torque aplicado en cada articulación.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_c \quad (4)$$

- Modelo de movimiento restringido.-Se considera restringido cuando el efector final esta en contacto con un ambiente, es decir, se considerará la existencia de fuerzas de reacción sobre este y por lo tanto sobre las articulaciones, siendo el modelo el mismo que en movimiento libre pero agregando estas reacciones previamente modeladas en (3), mostrando el modelo en (5).

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_c + \tau_A \quad (5)$$

3. Esquema de Control

Recordando que al trabajar con robots industriales de arquitectura cerrada, no se tiene control directo sobre las señales transmitidas a los actuadores de este, por lo que se tiene que realizar todo el proceso de control con los comandos de movimiento de posición cartesiana o articular nativos del software *RobotStudio* propio de ABB.

3.1. Control de fuerza

La posición comandada X_c , como argumento del comando de movimiento, estará dada por la suma de la posición de contacto X_d y la salida del control de fuerza X_p , siendo esta salida la penetración que debe de realizarse en el ambiente para obtener la fuerza deseada, mostrada en (6).

$$X_c = X_d + X_p \quad (6)$$

Siendo el control de fuerza un PI, mostrado en (7).

$$X_p = k_f \cdot e_f + k_{if} \int e_f dt \quad (7)$$

Definiendo el error de fuerza en (8).

$$e_f = F_d + F_c + F_a - F_r \quad (8)$$

Donde F_d es la fuerza deseada para la sujeción, F_c la salida del control de posición del objeto, F_a la salida del control de acoplamiento, ambos controles mostrados a continuación y F_r la fuerza real medida del ambiente.

3.2. Control de Posición del Objeto

Siendo el control de posición del objeto un PID, el cual da una fuerza agregada a la deseada para que se realice el movimiento del objeto, mostrando el control en (9).

$$F_c = k_c \cdot e_c + k_{dc} \dot{e}_c + k_{ic} \int e_c dt \quad (9)$$

Y definiendo para ambos robots el error de posición de la misma manera, al tener ambos robots los datos de posición de ambos efectores finales, la posición del centro de masa es fácilmente calculable con la ecuación del punto medio, por lo que el error esta dado por (10).

$$e_c = X_{cd} - \frac{1}{2}(X_{R_1} + X_{R_2}) \quad (10)$$

Donde X_{cd} es la trayectoria deseada a seguir del centro de masa del objeto en el espacio de trabajo.

3.3. Control por Acoplamiento Dinámico de Segundo Orden

El control por acoplamiento está encargado de crear una fuerza agregada que logre mantener la distancia de agarre constante, mostrando las ecuaciones del control en (11).

$$\begin{aligned} F_a &= k_\alpha \cdot e_\alpha & \dot{e}_\alpha &= -k_{d1} \cdot e_\alpha + f_\alpha \\ \dot{f}_\alpha &= -k_{d2} \cdot e_\alpha - k_{d3} \cdot f_\alpha + k_a \cdot e_a \end{aligned} \quad (11)$$

Donde nuevamente, el error de acoplamiento esta definido de la misma manera para ambos robots, describiéndolo en (8).

$$e_a = X_{R_1} - X_{R_2} - d \quad (12)$$

Con d la distancia de agarre deseada para que el objeto no sufra deformaciones adicionales o pierda el agarre estable.

3.4. Diagrama de Control

El diagrama de control de un sólo robot se puede observar en la Figura 1.

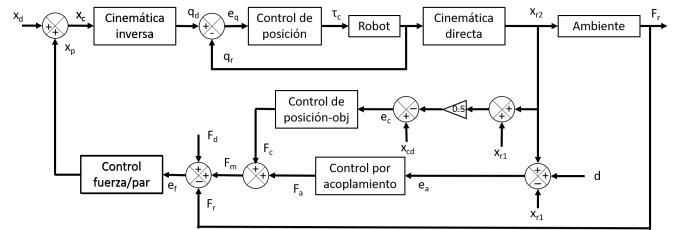


Figura 1: Diagrama general de control para un sólo robot

Simplificando el diagrama recordando que al ser un robot de arquitectura cerrada, no tenemos acceso a la cinemática inversa, ni a su control de posición, ni a la señal de los actuadores o cinemática directa pero sabiendo que el control del robot esta bien sintonizado podemos considerar que $X_R \approx X_c$ Horst J. Bessai (2005), y entendiendo que antes de llegar a la posición de contacto, el sistema actuara como dos robots independientes en movimiento libre por lo que ningún control externo será accionado, por lo que cuando se entre en contacto con el objeto y se pase al modelo de movimiento restringido el punto de contacto será el inicial, por lo que se puede tomar la consideración de que $X_d = 0$. Y al ser un sistema coordinado el diagrama debe de incluir ambos robots, por lo que con estas consideraciones, el diagrama de control de todo el sistema se puede observar en la Figura 2.

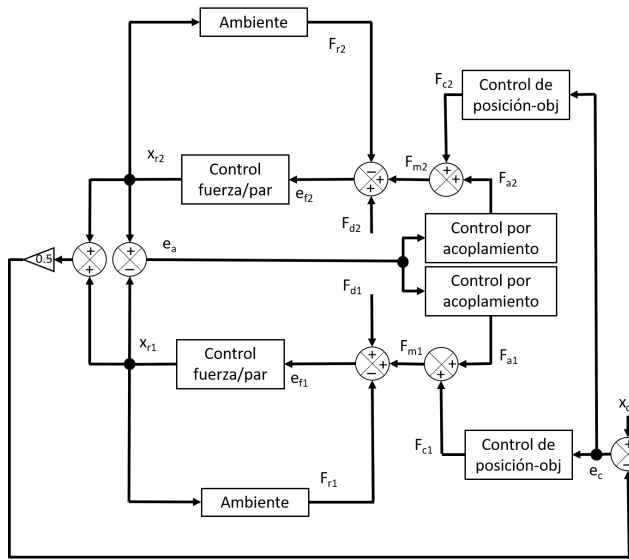


Figura 2: Diagrama de control del sistema coordinado

Notando que el sistema tendrá únicamente tres entradas: F_{d1} , F_{d2} que son las fuerzas deseadas para lograr la sujeción del objeto y X_{cd} la trayectoria de movimiento deseada del centro de mesa del objeto en el espacio de trabajo. y las salidas de este, los diferentes errores de fuerza e_{f_i} , el error de posición del objeto e_c y el error de acoplamiento e_a .

Por lo que, podemos obtener la función de transferencia de cada bloque del diagrama previamente mostrado, denominando $G_c(s)$ como la función de transferencia del control de posición-objeto, $G_a(s)$ como la función de transferencia del control por acoplamiento, $G_f(s)$ como la función de transferencia del control fuerza/par y K_A como la rigidez del ambiente como se muestra en (13) (nota: se toma en cuenta que las señales transmitidas a través del diagrama de bloques son vectores y que los controles utilizan matrices de tipo diagonal, por lo que los ejes están desacoplados Caccavale, Chiacchio, Marino, Villani (2008)).

$$\begin{aligned} \frac{x_r(s)}{e_f(s)} &= G_F(s) = k_f + \frac{k_{if}}{s} \\ \frac{F_c(s)}{e_c(s)} &= G_{cc}(s) = k_c + k_{dc}s + \frac{k_{ic}}{s} \\ \frac{F_a(s)}{e_a(s)} &= G_A(s) = \frac{k_a k_\alpha}{s^2 + (k_{d1} + k_{d3})s + k_{d2} + k_{d1}k_{d3}} \end{aligned} \quad (13)$$

4. Análisis de Estabilidad

Al ser un sistema MIMO (*Multiple-input Multiple-output*), lineal y desacoplado debido a la alta reducción de los motorreductores dentro de las articulaciones del robot, se puede utilizar el teorema de superposición de efecto para obtener una función de transferencia de cada entrada respecto de cada salida, obteniendo doce funciones de transferencia Simon Haykin, Barry Van Veen (2003).

Utilizando la formulación de Mason para sistemas con múltiples lazos cerrados Benjamin C. Kuo (1996), se procede a realizar las doce configuraciones con sus respectivos diagramas

de flujo, mostrando los resultados en (14).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{f1} \\ e_{f2} \\ e_c \\ e_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{k_f} & \frac{1}{2K_A k_f + 2} & -\frac{1}{2K_A k_f + 2} \\ \frac{1}{k_f} & -\frac{1}{2K_A k_f + 2} & \frac{1}{2K_A k_f + 2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_f}{K_A k_f + 1} & -\frac{k_f}{K_A k_f + 1} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{P(s)} \begin{bmatrix} Z_1(s) & Z_3(s) & Z_4(s) \\ Z_1(s) & Z_4(s) & Z_5(s) \\ Z_2(s) & Z_5(s) & Z_5(s) \\ 0 & Z_6(s) & -Z_6(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cd} \\ F_{d1} \\ F_{d2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

Notando que algunas de las funciones de transferencia no son estrictamente propias, poseyendo un offset dependiente de la ganancia proporcional del control de fuerza k_f y de la rigidez del ambiente K_A . Complementando con que todas las funciones de transferencia poseen los mismos polos, siendo estos definidos por el polinomio $P(s)$ mostrado en (15).

$$P(s) = a_1 s^6 + a_2 s^5 + a_3 s^4 + a_4 s^3 + a_5 s^2 + a_6 s + a_7 \quad (15)$$

Con los coeficientes a_i funciones de las ganancias de los controles y la rigidez del ambiente. Revisando su estabilidad por el criterio de Routh-Hurwitz, usando la tabulación de Routh como se muestra en la Tabla ??.

Para cumplir que el sistema sea estable, todos los elementos de la primer columna de la tabulación deben poseer el mismo signo Katsuhiko Ogata (1998). Por lo que con esta tabulación se pueden encontrar condiciones para asegurar la estabilidad del sistema multi-robot, mostradas en (16).

$$\begin{aligned} a_2 a_3 &> a_4 a_1 \\ A_1 a_4 + a_1 a_6 &> a_2 a_5 \\ A_3 A_2 + a_2 a_7 &> A_1 a_6 \\ A_5 A_4 &> A_3 a_7 \\ K_A k_{d2} + K_A k_{d1} k_{d3} &> k_a k_\alpha \end{aligned} \quad (16)$$

5. Implementación

El experimento consta de dos robots industriales de la marca ABB, los cuales son controlados por una unidad IRC5; ambos robots poseen una adaptación en su efector final para poder colocar sensores externos a la marca, utilizando dos sensores de fuerza, uno de la marca ATI y otro de la marca JR3.

5.0.1. Unidad IRC5

Unidad de control precargada con un sistema operativo denominado *RobotWare*, el cual permitió la programación de tareas a través del software propio de la empresa *RobotStudio*, basado en el lenguaje de programación *RAPID*.

5.0.2. Sensor ATI

Modelo Mini45, capaz de medir fuerzas y momentos en los tres ejes coordenados, con un rango de medición de ± 290 [N] en el eje Z y ± 145 [N] en los ejes X, Y; y con una resolución de $\frac{1}{16}$ [N]. Posee una tarjeta de adquisición de datos independiente, capaz de ser conectada a una computadora a través de un cable USB tipo A.

5.0.3. Sensor JR3

Modelo 50M31A3, capaz de medir fuerzas y momentos en los tres ejes coordenados, con un rango de medición de ± 200 [N] en el eje Z y ± 100 [N] en los ejes X, Y; y con una resolución de 0.038 [N]. Posee una tarjeta de adquisición de datos que puede ser integrada a la tarjeta madre de una computadora mediante un conector PCI.

Mediante una interfaz de consola programada en lenguaje C++ se accede a la configuración inicial de los sensores para poder llevar a cabo mediciones de estos, información la cual será enviada por protocolo serial a través de un cable RS-232, recibiendo datos del mismo robot e intercambiando la información para el sistema de coordinación.

Mientras que el código de los robots es realizado en su software nativo, en el cual se programa la habilitación de los puertos seriales para la comunicación, e internamente se habilita el reloj del proceso, para aplicar los métodos numéricos necesarios de derivación e integración para la implementación de los diferentes controles y la recopilación de los datos para su posterior graficación dentro del ambiente de *MATLAB*. Corroborando la disposición de la planta, el movimiento del robot, localización del punto de contacto y configuración deseada de las articulaciones del robot mediante una simulación dentro del ambiente de *RobotStudio*, mostrando la disposición general del experimento en la Figura 3.

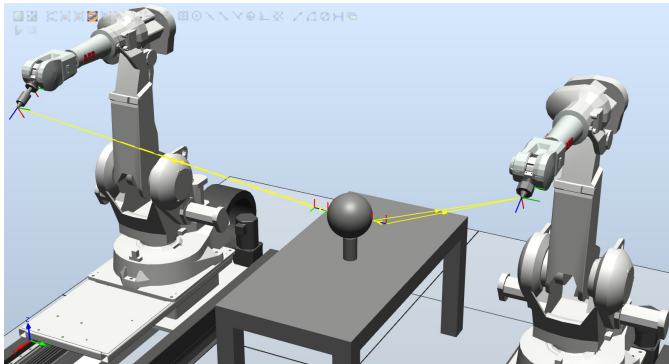


Figura 3: Disposición de planta en el ambiente de *RobotStudio*

6. Experimento

Definiendo un marco de referencia global para el sistema coordinado, ubicado en el punto medio de las bases de ambos robots, se utiliza un balón de basquetbol para llevar a cabo la manipulación, llevando a cabo el experimento con movimiento horizontal ubicado en el plano, como se aprecia en la Figura ??.

Siendo las ganancias utilizadas para el experimento $k_f = 0,007$, $k_{if} = 0,4$, $k_c = 2$, $k_{dc} = 2,5$, $k_{ic} = 0,8$, $k_\alpha = 2$, $k_a = 3$, $k_{d_1} = 1,5$, $k_{d_2} = 2$ y $k_{d_3} = 2$, cumpliendo estas ganancias con los criterios de estabilidad (16), el experimento se divide en las siguientes etapas:

1. Aproximación.-Para asegurar la coordinación de ambos robots se utiliza la lógica de semáforos, por lo que ambos son accionados y estarán en posición de reposo hasta que se active el programa de la computadora y les dé la

señal de arranque, después de esto ambos se moverán a un punto cercano del punto de contacto a espera de que el compañero también lo alcance, siendo los puntos de aproximación:

$$(R_1) : X_{d_1} = [0, 210, 995] \text{ [mm]}$$

$$(R_2) : X_{d_2} = [0, -210, 995] \text{ [mm]}$$

2. Contacto.-Una vez alcanzado el punto de aproximación, se mandará una señal de éxito y ambos robots partirán al punto del contacto, posición en la que ambos efectores finales estarán en la superficie del objeto, por lo que estas dos etapas solamente son de movimiento libre. Siendo los puntos de contacto:

$$(R_1) : X_{d_1} = [0, 130, 995] \text{ [mm]}$$

$$(R_2) : X_{d_2} = [0, -130, 995] \text{ [mm]}$$

3. Agarre.-En este momento se pasa del movimiento libre al movimiento restringido, al empezar a realizar una penetración en el objeto gobernada únicamente por el control de fuerza, realizando una trayectoria de la fuerza deseada con una función negativa del recíproco del exponencial para asegurar suavidad, mostrada en (17). La cual efectúa una aplicación de fuerza de 0 a 20 [N] en 15 [s] y posteriormente mantenerse en 20 [N], logrando el agarre del objeto y posterior al agarre lo levanta de la base, en este momento se determina la distancia de agarre.

$$F_d = \mp 20 \left(1 - e^{-0,5(t-t_{ini})} \right) \quad (17)$$

Donde t es el tiempo actual de simulación y t_{ini} el valor de tiempo en que inicio la etapa.

4. Movimiento horizontal.-Una vez levantado el objeto, ambos robots se asegurarán de que el centro de masa del objeto siga una trayectoria deseada mostrada en (18), a la par de esto, se asegurarán de que la distancia de agarre se mantenga constante para evitar deformaciones adicionales en el objeto o pérdida de fuerza de agarre.

$$X_{cd} = \left[0, 100 \sin\left(\frac{\pi(t-t_{ini})}{50}\right), 0 \right]^T \text{ [mm]} \quad (18)$$

Complementando que al operar con un sistema de arquitectura cerrada en los robots, no se puede controlar con precisión el tiempo de muestreo, pero funcionando de manera correcta al operar con un tiempo de muestreo promedio de 98 ms.

7. Resultados

Como se puede observar, en la Figura 5 se muestra la gráfica de fuerzas deseadas vs las generadas por los robots.

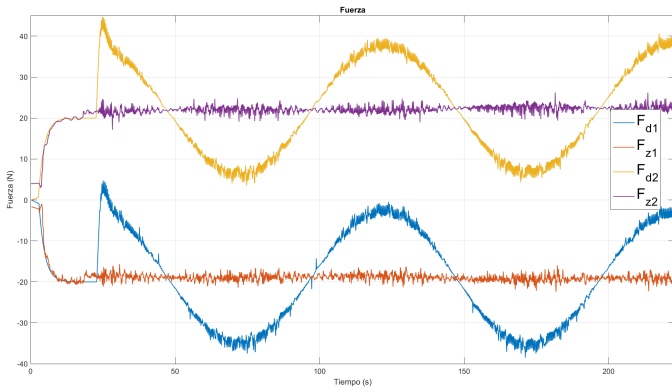


Figura 5: Fuerzas deseadas vs fuerzas generadas

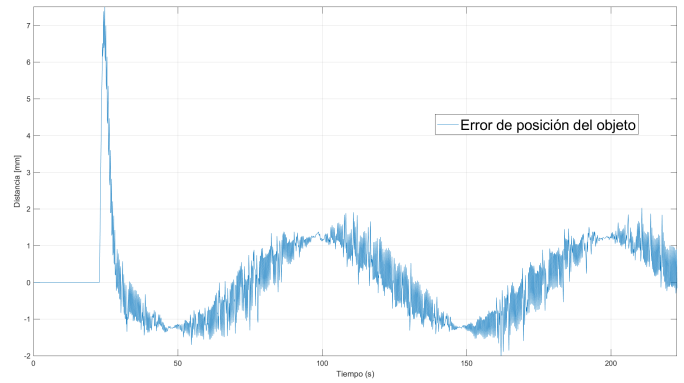


Figura 7: Error de posición del objeto

Notando que en la etapa de agarre (0 a 20 [s]) el error de fuerza es casi nulo, pero cuando se entra en la etapa de movimiento horizontal este error aumenta y se desfasa proporcionalmente a la trayectoria deseada, debido al offset de las funciones de transferencia de los errores de fuerza, siendo este el recíproco del de la ganancia proporcional del control k_f y al estar este en el orden de milésimas, el error de fuerza es considerable, recordando que el propósito del sistema es realizar una trayectoria deseada con una sujeción constante de 20 [N].

Por lo que en la Figura 6 se puede observar como el centro de masa del objeto realiza el seguimiento de la trayectoria deseada, desarrollando dos ciclos completos de esta, desde 20 a 220[s].

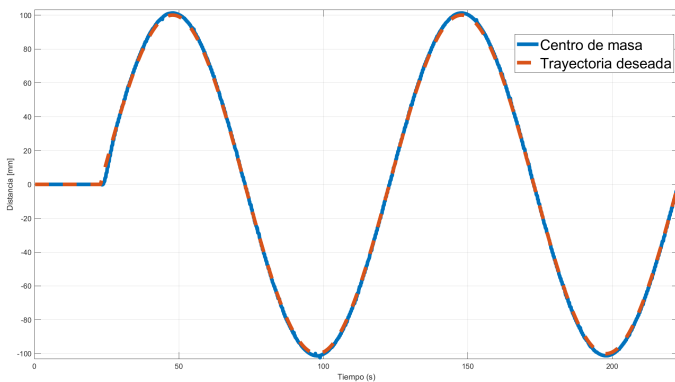


Figura 6: Seguimiento de la trayectoria del centro de masa

Por lo que para saber el porcentaje de error que muestra este sistema respecto de la trayectoria deseada se muestra el error de posición del objeto en la Figura 7, donde se puede observar que este se encuentra acotado en ± 2 [mm] siendo el porcentaje de error de seguimiento de aproximadamente 2 %, por lo que se considera un seguimiento efectivo.

Paralelamente para el error de acoplamiento, se realizó la prueba aplicando el acoplamiento y sin este, ambos sistemas tuvieron desempeños similares en cuanto al seguimiento de trayectoria, pero el control por acoplamiento logró aumentar el desempeño al momento de mantener la distancia de agarre constante, mostrando ambos resultados en la Figura 8.

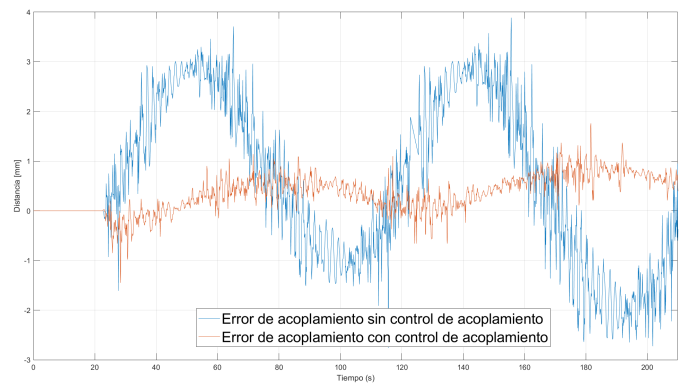


Figura 8: Error de acoplamiento, sin control vs con control

Notando que cuando se aplica el control de acoplamiento de segundo orden, el error queda acotado en el primero ciclo en ± 1 [mm] y para el segundo ciclo queda acotado de 0 a 1 [mm], por lo que se puede confirmar que el sistema tiende a converger a cero, pero que mientras el sistema sin el control en el primer ciclo esta acotado de -2 a 3 [mm] y en el segundo ciclo tiende a aumentar el error, por lo que podría causar deformaciones no deseadas al objeto o en su defecto, pérdida de sujeción.

En consecuencia, la distancia de agarre se mantuvo constante, al ser un balón de baloncesto, el diametro de este es de 240 [mm] y después de realizar la penetración necesaria para obtener la fuerza deseada, la distancia de agarre resulto de 233.38 [mm] por lo que en la Figura 9 se observa la variación de esta durante el movimiento horizontal, desde 20 a 220 [s].

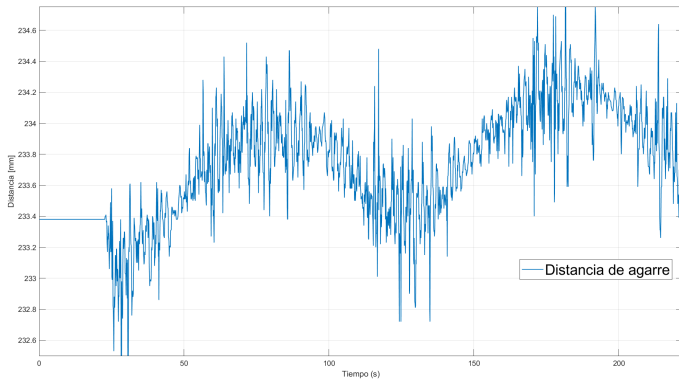


Figura 9: Comportamiento de la distancia de agarre

8. Conclusión

Gracias a los resultados experimentales se puede concluir que el control por acoplamiento puede asegurar que un sistema multi-robot pueda realizar tareas en donde se necesite una ma-

nipulación segura de algún objeto, ya sea por la fragilidad de este o por algún requerimiento especial del operario. Además de recalcar la importancia que es el de poder agregar sistemas de control externos a un robot industrial de arquitectura cerrada con ayuda de sensores externos de la marca del robot, dando oportunidades de implementar procesos o herramientas para los cuales no fueron diseñados gracias a algún acondicionamiento.

Referencias

- N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Part II: Implementation. *ASME, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 107, pp. 8-16, 1985.
- Fabrizio Caccavale, Pasquale Chiacchio, Alessandro Marino y Luigi Villani. Six DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 13, pp. 576-586, 2008.
- Simon Haykin y Barry Van Veen. *Signals and Systems. 2da ed. Hoboken, NJ: Wiley*, 2003.
- Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering. 3ra ed. Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana*, 1998.
- Benjamin Chung-i Kuo. *Automatic Control Systems. 6ta ed. Madrid: Prentice Hall Hispanoamericana*, 1996.
- Horst J. Bessai. *MIMO Signals and Systems. 2005a ed. Springer*, 2005.