

Control deslizante de un robot paralelo de tres grados de libertad para realizar actividades de mantenimiento naval

Sliding Mode Control of a parallel robot with three degrees of freedom to perform naval maintenance activities

Miguel Ângelo Dos Santos Pereira^{1*}, Ilka Arelys Banfield¹

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.dossantos@utp.ac.pa

RESUMEN—La Robótica ha experimentado una gran evolución debido a los avances tecnológicos. Uno de sus campos de estudio y desenvolvimiento es el control de sus movimientos. Este trabajo de investigación es parte importante para el aporte y desarrollo tecnológico industrial y propone el control de un robot portátil paralelo tres grados de libertad para realizar la tarea del conformado metálico por líneas de calor "Line Heating", para embarcaciones en alta mar, mejorando los costos del proceso y los tiempos de servicio de esta tarea de mantenimiento. El Robot debe cumplir con los elevados requerimientos de desempeño impuestos por la tarea; un robusto controlador ante perturbaciones externas. Se implementa un control por modos deslizantes SMC "Sliding Mode Control" para el posicionamiento de la herramienta en un robot paralelo, tipo RPS (por sus siglas en inglés, *Revolute-Prismatic-Spherical*). El método de control exige la utilización de la dinámica del sistema y su solución en tiempo real. Este trabajo presenta, la dinámica que modela el comportamiento del sistema, realizada por el método de Trabajos Virtuales que brinda un menor tiempo computacional, comparado con formulaciones dinámicas usuales, debido a ecuaciones más compactas y al menor número de operaciones aritméticas.

Palabras clave— Control por modos deslizantes, Conformado metálico por líneas de calor, Mantenimiento naval en alta mar, Principio de los trabajos virtuales, Robot paralelo, RPS, Sistema de control Robusto.

ABSTRACT— Robotics has experienced a great evolution due to technological advances. One of its fields of study and development is the control of its movements. This research work is an important part for the contribution and industrial technological development and proposes the control of a parallel portable robot with three degrees of freedom to perform the task of metal shaping at sea using heat lines "Line Heating", so decrease process costs and service times. The Robot must comply with the high-performance requirements imposed by the task, a robust controller against external disturbances. Sliding mode control SMC "Sliding Mode Control" is implemented for positioning the tool in a parallel robot, RPS (*Revolute-Prismatic-Spherical*) type. The control method requires the use of system dynamics and its solution in real-time. This work presents, the dynamics that model the behavior of the system, performed by the Virtual Works method that provides less computational time, compared to usual dynamic formulations, due to more compact equations and the lower number of arithmetic operations.

Keywords— Line Heating, Offshore Naval Maintenance, Parallel robot, Robust control system, RPS, Sliding Mode Control, Virtual work method.

1. Introducción

La industria naval actual en Panamá no cuenta con robots para las tareas de mantenimiento, y los que existen en el mercado mundial tienen su campo de aplicación restringido, son pesados y muy costosos. Estos robots son pensados para el trabajo dentro de los astilleros, desarrollados como una familia de sistemas robóticos que

realizan procesos tales como limpieza y pintura, preservando la integridad, y condiciones de la estructura.

En Japón la industria de naves ha asegurado su competitividad a través de técnicos calificados, sin embargo, dado que sus habilidades no han sido sistematizadas han surgido serias preocupaciones acerca de una rápida pérdida de habilidades como experto. A

Citación: M. Dos Santos y I. Banfield, "Control deslizante de un robot paralelo de tres grados de libertad para realizar actividades de mantenimiento naval", Revista de I+D Tecnológico, vol. 16 no. 2, pp. (), 2020

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 16 de marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 30 de julio de 2020. **Aceptado:** 31 de julio de 2020.

DOI:

Copyright: 2019 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

este problema en particular le denominaron “2007 Problem”, (problema 2007). Como solución a este problema, NEDO (*New Energy and industrial technology Development Organization*), desarrolló el proyecto “Digital Master Project” del 2001 al 2005, el cual tenía como objetivo ayudar a la pequeña, y mediana industria de construcción naval. Uno de estos “2007 Problem” se determinó era el “Line Heating”, conformación del metal por medio de calentamiento, el cual requiere un mínimo de 10 años de entrenamiento. Como resultado de este proyecto se desarrolló, el sistema llamado “IHI Alpha” [1], que utilizando una combinación de calentamiento en línea y formado en frío logra las curvas deseadas en placas metálicas originalmente planas.

Este proceso realizado manualmente es una labor intensa. El mantenimiento en buques todavía es una aplicación manual afuera del astillero donde se requiere movilidad y total confiabilidad. Actualmente no hay robots para esta tarea específica, lo que hace que el proceso sea más caro porque es más demorado a causa de los varios parámetros que deben ser controlados.

De ahí, el interés en desarrollar un sistema automatizado para la aplicación de conformado metálico por líneas de calor de forma rápida, precisa, y con calidad en el mantenimiento de buques fuera del astillero, substituyendo el trabajo manual que es muy difícil y arduo de hacer. La idea que cuyo estudio se inicia con este trabajo es que en la misma plataforma contenga dos tipos de control, un control clásico, y un control robusto de posición. El control clásico se encargará del posicionamiento en el plano de robot 3-RPS y el control robusto que asegurará el posicionamiento más refinado del robot paralelo con la menor sensibilidad a las perturbaciones.

El objetivo del presente trabajo es controlar con precisión los movimientos de un robot portátil paralelo de tres grados de libertad tomando las perturbaciones externas a fin de disminuir la sensibilidad del sistema de control en las reparaciones de las embarcaciones en sitio por medio del conformado metálico por líneas de calor.

A continuación, se presenta la dinámica inversa y dinámica directa por el principio de los trabajos virtuales [2] [3] [4], análisis de la estabilidad [5] y las simulaciones utilizando un sistema de control clásico PID “Proporcional Integral Derivativo” [6] [7] y el sistema de control propuesto por modos deslizantes SMC [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20].

2. Formulación de las ecuaciones Dinámicas del Robot Paralelo 3-RPS

En la figura 1, muestra la estructura del robots 3-RPS, se puede observar que el robot tiene una plataforma móvil con un sistema coordenado $\{Px'y'z'\}$, unida a una plataforma fija con un sistema coordenado global definido como $\{Oxyz\}$ mediante tres eslabones, cada eslabón tiene una configuración RPS, es decir, la plataforma fija se une a los eslabones mediante uniones revolutas A_i , los eslabones se unen mediante un par prismático (cilindro y pistón) y la plataforma móvil se une a los eslabones por medio de las uniones esféricas B_i , d_i representa la medida de la distancia entre A_i , hasta B_i de cada eslabón i , h es el radio de la plataforma móvil y g es radio de la plataforma fija y ϕ_i es el ángulo de la junta de revoluta.

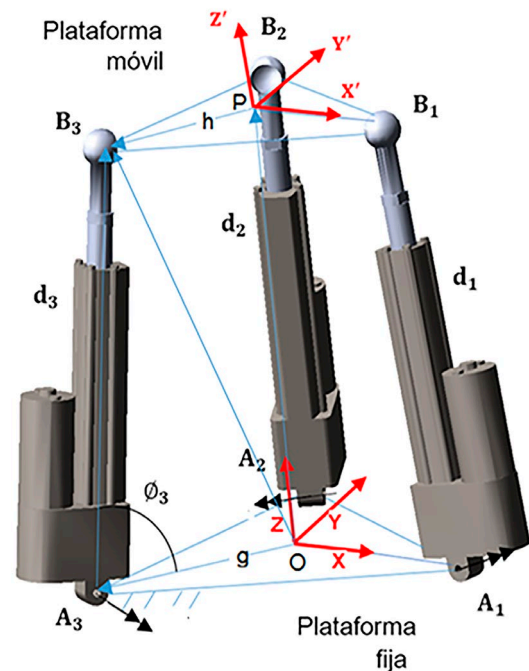


Figura 1. Representación de la estructura del 3-RPS

Para aplicar el principio de trabajos virtuales en los robots paralelos se determinan las fuerzas debido a la inercia, tanto de los eslabones como de la plataforma móvil, y se describen a continuación,

$$\hat{F}_k = \begin{bmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{n}_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\hat{F}_k = \begin{bmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{n}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_k g - m_k \dot{v}_k \\ -I_k \dot{w}_k - w_k \times (I_k w_k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde \hat{F}_k es el vector de fuerza expresado de manera general, \hat{f}_k y \hat{n}_k son las fuerzas y los pares de inercia ejercidas en el centro de masa de cada elemento, cuerpo rígido del robot (plato móvil, cilindro y pistón). m_k es la matriz de masa, I_k es la matriz de inercia, \dot{w}_k es la aceleración angular y w_k es la velocidad angular. Utilizando la notación de las ecuaciones (1) y (2) se definen los vectores, \hat{F}_p , vector de fuerzas generalizadas del centro de masa de la plataforma móvil, y \hat{F}_i vector de fuerzas generalizadas en cada enlace, cuerpo rígido del robot, en las ecuaciones (3) y (4).

$$\hat{F}_p = \begin{bmatrix} \hat{f}_p \\ \hat{n}_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\hat{F}_i = \begin{bmatrix} \hat{f}_i \\ \hat{n}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se incorporan las ecuaciones 3 y 4 para presentar la ecuación de la dinámica inversa del 3-RPS utilizando el principio de los trabajos virtuales en la siguiente expresión:

$$\delta q^T \tau + \delta x_p^T \hat{F}_p + \sum_i \delta x_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (5)$$

donde δx_p es el desplazamiento virtual del vector de coordenadas generalizadas en el espacio de tareas del robot $x_p = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$, δq es el desplazamiento virtual del vector de coordenadas posición de las juntas actuadas y δx_i , es el i -ésimo desplazamiento virtual de las juntas pasivas del robot. Los desplazamientos virtuales en la ecuación 5, deben ser compatibles con las restricciones cinemáticas de las uniones. Por lo tanto, es necesario expresar los desplazamientos virtuales para un conjunto de desplazamientos virtuales independiente generalizados, δq . Por otro lado, El vector desplazamientos virtuales de las juntas actuadas, δq , está relacionado con los desplazamientos virtuales de la plataforma móvil δx_p , por la matriz Jacobiana del manipulador J_p :

$$\delta q = J_p \delta x_p \quad (6)$$

Además, el desplazamiento virtual del i -ésimo enlace pasivo, δx_i , puede ser relacionado con el desplazamiento virtual de la plataforma móvil δx_p por medio de la matriz

Jacobiana J_i que es Jacobiano de cada cuerpo rígido del actuador:

$$\delta x_i = J_i \delta x_p \quad (7)$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 6 en la 5, se tiene:

$$\delta x_p^T (J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) = 0 \quad (8)$$

La ecuación 8, es válida para cualquier desplazamiento virtual δx_p :

$$J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (9)$$

La ecuación 9 según Tsai [21], se utiliza para describir la dinámica del robot paralelo presentado en este trabajo.

En general, cuando el robot no es redundante, está completamente actuado, el número de actuadores es igual al número de grados de libertad del manipulador y J_p es una matriz cuadrada. De esta manera, la ecuación 10, determina el vector de torques τ :

$$\tau = -J_p^{-T} (\hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) \quad (10)$$

Por otro lado, si el número de actuadores es mayor que el número de grados de libertad, τ tiene muchas soluciones aplicando la técnica de la pseudoinversa [22].

En la ecuación (10), el Jacobiano del Robot se implementa utilizando la relación entre las velocidades dependientes e independientes en la plataforma móvil, y para su implementación como parte de la ley de control se requiere de su linealización. Se obtiene la forma lineal de la dinámica del Robot 3-RPS, en función de los parámetros dinámicos del sistema, φ y la matriz regresora Y , como se muestra en la ecuación (11):

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \varphi \quad (11)$$

La linealización se obtiene por medio del Principio de Jourdain's. Se detalla su implementación en las referencias [23] y [24].

2.1 Desarrollo del modelo Dinámico Directo

El desarrollo del modelo dinámico directo permite contar con un modelo que puede ser usado para desarrollar esquemas de control. Del modelo directo puede despejarse la aceleración y así obtener un sistema de ecuaciones diferenciales que al integrarse en el tiempo permite predecir el comportamiento de la planta para un par aplicado. El modelo directo permite ser usado como

sustituto del robot real y así, de esta manera, hacer pruebas del controlador que se requiere implementar.

Se reestructura la ecuación 2 en forma matricial [4] para determinar el vector de aceleraciones del centro del efector final, para el caso, centro la plataforma móvil,

$$\hat{F}_k = \tau_{ext,p} - M_k \ddot{x}_k - V_k \dot{x}_k - G_k \quad (12)$$

donde $\tau_{ext,p}$ representa el vector torques y momentos externos en el espacio de trabajo del robot, M_k la matriz de masa global, V_k es el vector de fuerzas de coriolis global, G_k es la matriz de gravedad global.

A continuación, se reescribe la ecuación (12) para determinar la dinámica directa del 3-RPS:

$$J_p^T \tau_{act} + \tau_{ext,p} = M_p \ddot{x}_p + V_p \dot{x}_p + G_p + \sum_i J_i^T (M_i \ddot{x}_i + V_i \dot{x}_i + G_i) \quad (13)$$

$$\dot{x}_i = J_i \dot{x}_p \quad (14)$$

$$\ddot{x}_i = J_i \ddot{x}_p + \dot{J}_i \dot{x}_p \quad (15)$$

donde M_p , V_p y G_p representan las matrices de Inercia, el vector de fuerzas de Coriolis y el vector de Gravedad de la plataforma móvil, $\tau_{ext,p}$ representa el vector de fuerzas externas, M_i , V_i y G_i representan las matrices de Inercia, vector de fuerzas de Coriolis y el vector de Gravedad de los cuerpos rígidos del robot, J_i y \dot{J}_i representan el Jacobiano y derivada del Jacobiano entre cada cuerpo y la plataforma móvil.

Representando la ecuación en términos de las aceleraciones y velocidades del efector final en que se sustituye las ecuaciones 14 y 15 en la ecuación 13, se tiene:

$$J_p^T \tau_{act} = M_T \ddot{x}_p + V_T \dot{x}_p + G_T \quad (16)$$

$$\ddot{x}_p = [\dot{v}_p^T \quad \dot{w}_p^T]^T \quad (17)$$

$$\dot{x}_p = [v_p^T \quad w_p^T]^T \quad (18)$$

$$M_T = M_p + \sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T M_{i,j} J_{i,j}) \quad (19)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = V_p + \sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T V_{i,j} J_{i,j} + J_{i,j}^T M_{i,j} \dot{J}_{i,j}) \quad (20)$$

$$G_T = G_p + (\sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T g_{i,j})) \quad (21)$$

donde \ddot{x}_p y \dot{x}_p representan los vectores de aceleraciones y velocidades, del efector final. La matriz de masa total M_T representa la suma de las matrices de masa de la plataforma móvil M_p más las matrices de masa de los cilindros y pistones. El vector de fuerzas de Coriolis total V_T representa la suma del vector de fuerzas de coriolis de cada parte del robot, donde $V_1 = V_p$, y V_2, V_3 representan coriolis de plataforma móvil, cilindro y pistón. El vector de gravedad total G_T representa la suma de la matriz de gravedad de la plataforma móvil G_p más las del cilindro y pistones.

El modelo directo es usado en este trabajo como sustituto del robot real y así poder implementar controladores del tipo PID y SMC.

El problema inverso es utilizado para estudiar las fuerzas requeridas por los actuadores del robot para una trayectoria particular que vaya a ser ejecutada por el robot. El modelo permite entonces seleccionar los motores o actuadores que puedan ser capaces de que el robot ejecute la trayectoria requerida.

Por otra parte, el modelo inverso puede ser empleado para desarrollar controladores que incluyan el modelo del sistema, tales como el Control *FeedForward* o el Control de Torque Computado y SMC.

3. Diseño del controlador por modos Deslizantes para el Robot Paralelo 3-RPS

La superficie deslizante del robot 3-RPS es representada por la siguiente ecuación:

$$s = \tilde{x}_{ps} + \lambda \tilde{x}_{ps} \quad (22)$$

El propósito de definir la superficie de esta manera es buscar una acción de control que fuerce al valor de la ecuación de superficie a ser igual a cero $s = 0$. Donde el \tilde{x}_{ps} es el error de velocidad entre actuadas y deseadas, λ es una matriz diagonal positiva definida y el \tilde{x}_{ps} viene a ser el error de posición del centro del plato móvil

Derivando la ecuación de la superficie de deslizamiento se tiene:

$$\dot{s} = \tilde{\dot{x}}_{ps} + \lambda \tilde{x}_{ps} \quad (23)$$

La estabilidad es determinada por la función de "Lyapunov" [14] [25]. una función escalar "V", que describe la energía del sistema.

De acuerdo con el método directo de “Lyapunov”, para que el sistema se encuentre estable debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$\dot{V} < 0 \quad (24)$$

Lyapunov (SLOTLINE, 1991) [5]:

$$V = \frac{1}{2} s^T M_t s \quad (25)$$

Donde, “V” es definida positiva debido a M_t . Derivando la función de “Lyapunov” se tiene:

$$\dot{V} = s^T M_t \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}_t s \quad (26)$$

Igualando las ecuaciones 11 y 16 que también son utilizadas para un robot paralelo tipo 3-RPS y sustituyendo en la aceleración y velocidad, la derivada de la superficie deslizante y la superficie deslizante se tiene:

$$Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} = M_t(\ddot{x}_d + \lambda \tilde{x}) + C_t(\dot{x}_d + \lambda \tilde{x}) + g_t \quad (27)$$

Donde M_t que es la matriz de masa total, C_t es el vector de fuerza de Coriolis total, g_t es el vector de gravedad total, Y es la matriz regresora y $\hat{\phi}$ es el vector de parámetros del robot, \tilde{x} derivada del error de posición y \tilde{x} es el error de posición.

$$M_t \dot{s} = Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t \quad (28)$$

Sustituyendo 28 en 26:

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t] + \frac{1}{2} s^T \dot{M}_t s \quad (29)$$

La ley de control es definida por la ecuación 30:

$$\tau_{act} = J_p^{-T} (Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} + K s \text{gn}(s) + g_t) \quad (30)$$

Sustituyendo la ecuación 30 en la 29, se tiene la 31:

$$\dot{V} = s^T \left[Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s + \frac{1}{2} \dot{M}_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t \right] \quad (31)$$

$$\frac{1}{2} s^T (\dot{M}_t - 2C_t) s = 0 \quad (32)$$

El término $(\dot{M}_t - 2C_t)$ de la ecuación 32 representa la matriz antisimétrica.

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - J_p^T \tau_{act} + g_t] \quad (33)$$

Reemplazando la ecuación 30 en la 33 se tiene:

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - K \text{sgn}(s) - g_t + g_t] \quad (33)$$

$$\dot{V} = -s^T K \text{sgn}(s) \quad (34)$$

La estabilidad del sistema en el robot 3-RPS puede ser probada utilizando Barbalat’s Lemma [5]. Para valores $\dot{V} \leq 0$, V tende a cero en el tiempo infinito.

4. Implementación del controlador SMC

Los tres grados de libertad seleccionados para esta aplicación en este robot, 3-RPS, fueron la posición en Z, altura PZ, y los ángulos, medidos alrededor el eje x, *Roll*, alrededor del eje y, *Pitch*. Su selección se basó en los requerimientos de la tarea.

Controlador MSC:

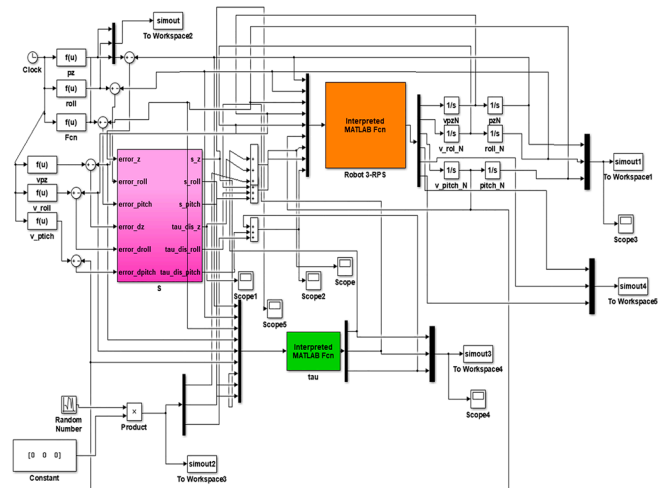


Figura 2. Diagrama de bloques en simulink para el control SMC 3-RPS.

El bloque en color naranja (*MATLAB Fcn*) representado en la figura 2, es la dinámica directa del mecanismo, en este mismo bloque entra un vector “MUX” de nueve variables referentes al centro del plato móvil que son: Error de posición en “PZ”, Error en *Roll*, Error en *Pitch*, Error de Velocidad en “PZ”, Error de Velocidad en *Roll*, Error de Velocidad en *Pitch*, y las fuerzas que actúan en “PZ”, *Roll*, *Pitch*. La señal de

fuerza que es entrada de la dinámica directa es la suma de las fuerzas externas de perturbación más las fuerzas generadas por la acción de control del SMC.

El bloque de color verde es la dinámica inversa linealizada que representa la parte continua de la acción de control del SMS que está siendo retroalimentado por las variables actuadas (“PZ”, Roll, *Pitch*) de posición, orientación, velocidades y aceleraciones (*s_z*, *s_roll*, *s_pitch*).

Los errores de posición, orientación y velocidades que entran en el bloque de color morado “S” como muestra en la figura 2, representa la parte discontinua de la acción de control, donde es generado una superficie deslizante para cada una de las variables independientes como muestra la figura 3.

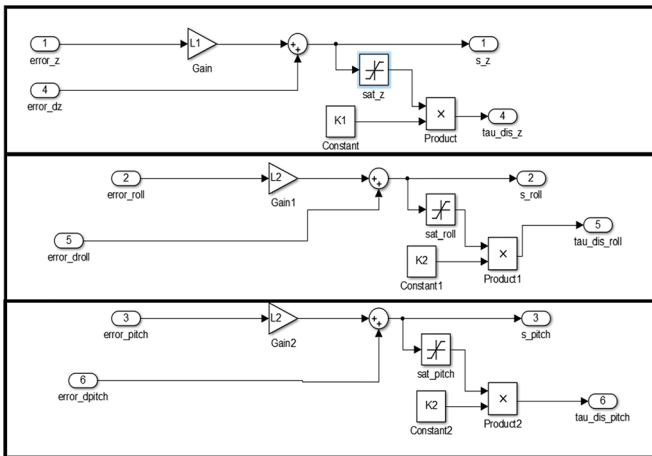


Figura 3. Bloque de Control por SMC

Se utiliza el bloque de saturación [19] para limitar los valores de alta frecuencia “Chattering” [26] posición “Z”.

4.1 Simulaciones utilizando el control PID

Para las simulaciones se utilizaron las siguientes entradas en *simulink*:

$$\begin{aligned} \text{Roll} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{Pitch} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{PZ} &= 0.35 + \text{amplitud_z} \cdot \sin(\omega \cdot t); \text{mplitud_z} = 0.04\text{m}. \end{aligned}$$

En la figura 4, muestra el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es corregida en el tiempo de simulación de $t=20$ segundos, cuando la convergencia del error se acerca a cero, haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

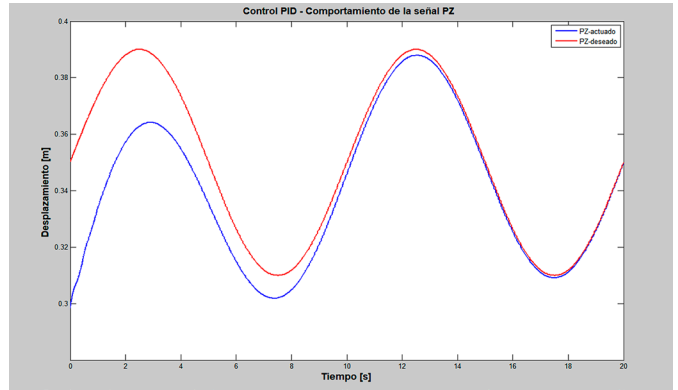


Figura 4. Control PID de la señal PZ

En las figuras 5 y 6, muestran el comportamiento de la señal de la fuerza en “PZ” y el comportamiento de la fuerza en cada actuador del robot 3RPS.

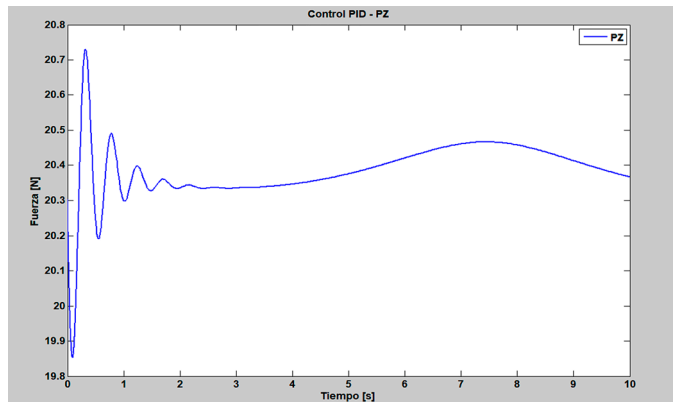


Figura 5. Control PID de la señal PZ en Newton.

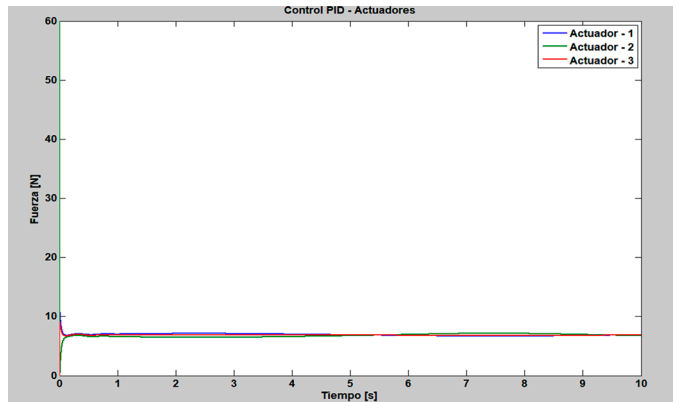


Figura 6. Control PID de la señal en cada actuador.

En las figuras 7 y 8, muestran el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida, en ambas gráficas se aprecia que la señal actuada es corregida a la medida que el tiempo avanza, en el tiempo de simulación de $t=0.15$ segundos en que la convergencia del error se

acerca a cero haciendo que la orientación en *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

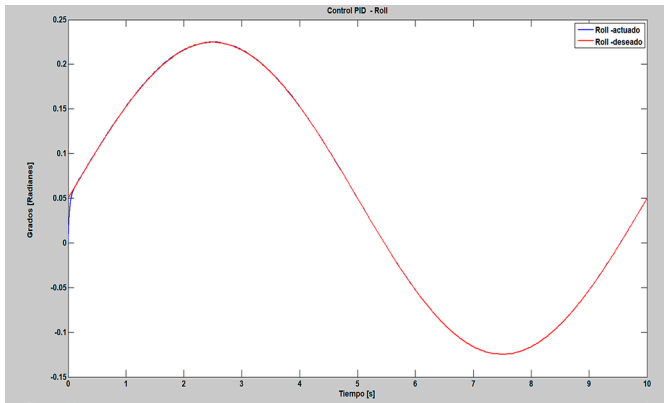


Figura 7. Control PID de la señal Roll.

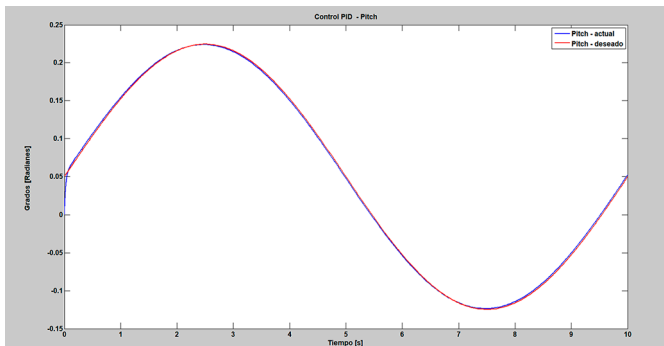


Figura 8. Control PID de la señal Pitch.

4.2 Simulaciones utilizando el control PID con perturbación externa.

Las simulaciones presentadas en esta sección para el sistema de control PID en el 3RPS, utilizaron las siguientes perturbaciones en unidades de Newton para cada variable independiente en $PZ=1$, $Roll=0.5$ y $Pitch=0.5$ representado por el bloque “constant”, el cual representan valores máximos y aleatorios.

Las figuras 9 y 10, muestran el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida y su comportamiento de la fuerza, se aprecia que la señal actuada es sensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de 1N haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot pierda la precisión del movimiento.

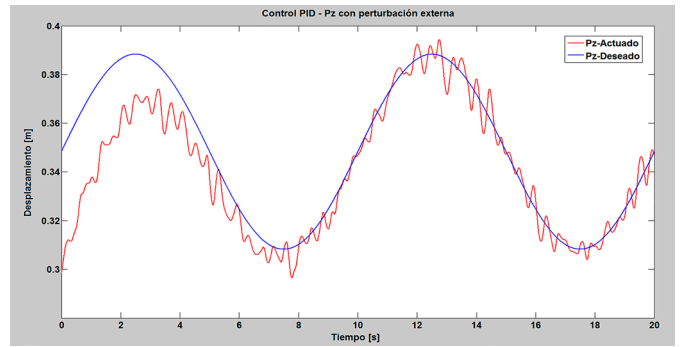


Figura 9. Control PID con perturbación en la señal PZ.

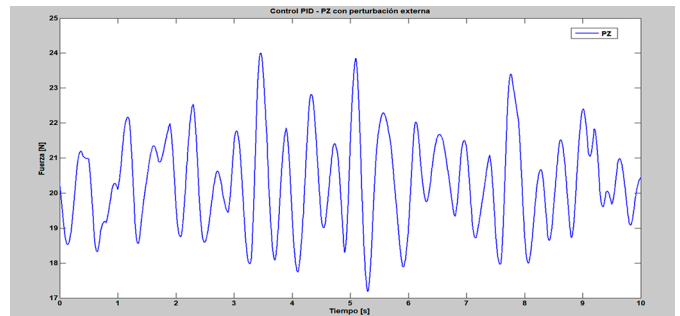


Figura 10. Comportamiento de la señal PZ en Newton con perturbación externa.

Las figuras 11 y 12, muestran el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es sensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de 0.5 N haciendo que la orientación en los ángulos *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot pierda la precisión del movimiento.

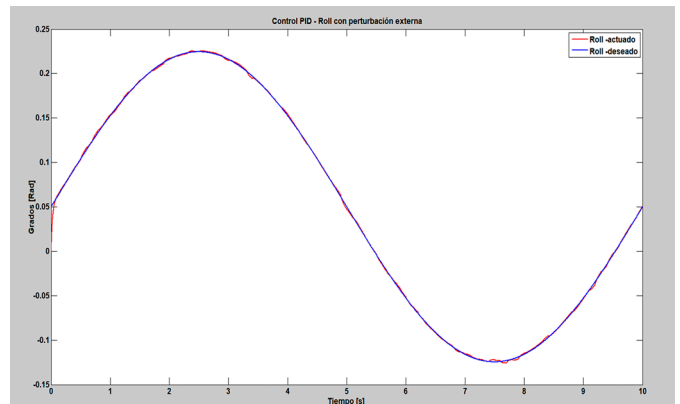


Figura 11. Control PID con perturbación en la señal Roll.

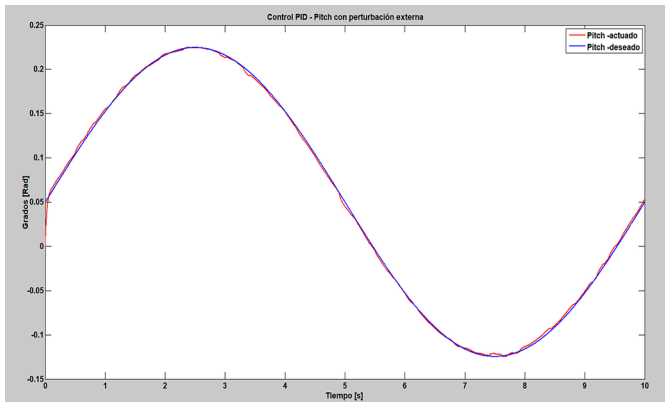


Figura 12. Control PID con perturbación en la señal Pitch.

4.3 Simulaciones utilizando el control SMC

Para las simulaciones se utilizaron las siguientes entradas en *simulink*:

$$\begin{aligned} \text{Roll} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{Pitch} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{PZ} &= 0.35 + \text{amplitud_z} \cdot \sin(\omega \cdot t); \text{mplitud_z} = 0.04\text{m}. \end{aligned}$$

En la figura 13, se muestra el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es corregida rápidamente, en el tiempo de simulación de $t=0.05$ segundos, la convergencia al error cero haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

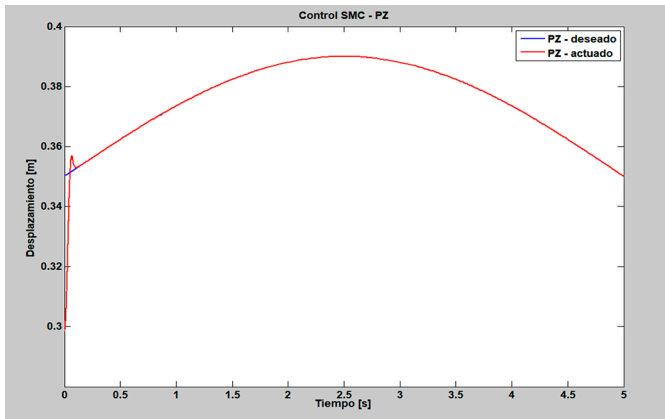


Figura 13. Control SMC de la señal PZ.

En las figuras 14 y 15, muestran el comportamiento de la señal de la fuerza en “PZ” y el comportamiento de la fuerza en cada actuador del robot 3RPS.

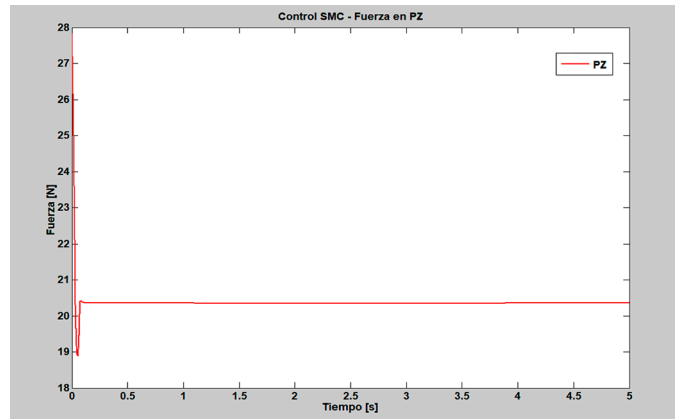


Figura 14. Control SMC de la señal de Fuerza en PZ.

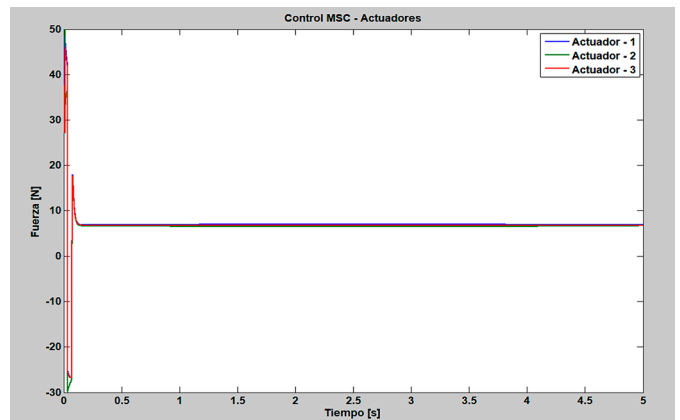


Figura 15. Control SMC de la señal en cada actuador.

La figura 16 muestra el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida; en ambas gráficas se aprecia que la señal actuada es corregida rápidamente, en el tiempo de simulación de $t=0.1$ segundos haciendo que la orientación en *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

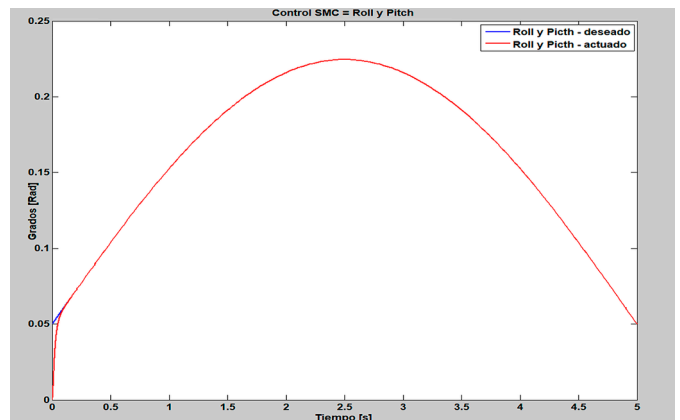


Figura 16. Control SMC de la señal Roll y Pitch.

4.4 Simulaciones utilizando el control SMC con perturbación externa.

Las simulaciones que se presentan en esta sección para el sistema de control SMC en el 3RPS utilizaron las siguientes perturbaciones en unidades de Newton para cada variable independiente en $PZ=1$, $Roll=0.5$ y $Pitch=0.5$ representado por el bloque “constant”, el cual representan valores máximos y aleatorios iguales utilizados en el PID.

Las figuras 17 y 18, muestran el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida y su comportamiento de la fuerza, se aprecia que la señal actuada es insensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de $1N$ haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot no pierda la precisión del movimiento.

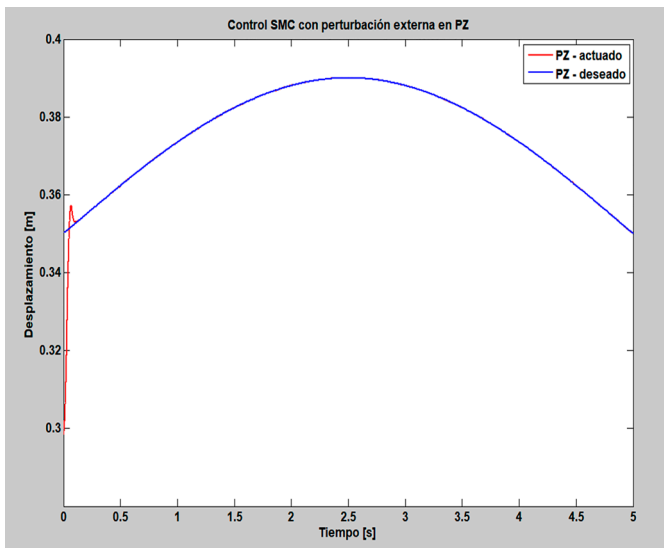


Figura 17. Control SMC con perturbación en la señal PZ.

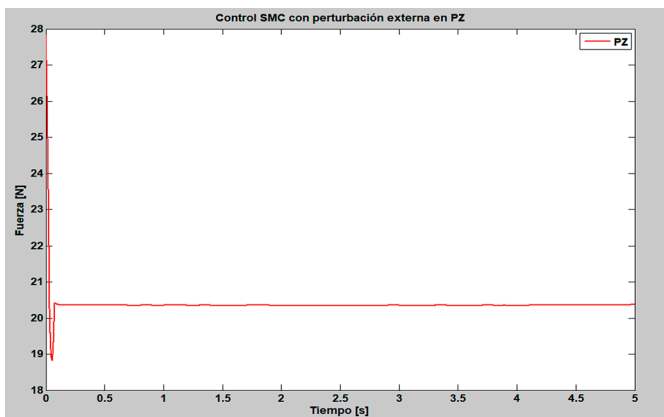


Figura 18. Comportamiento de la señal PZ en Newton con perturbación externa.

En la figura 19, muestra el comportamiento de la señal $Roll$ y $Pitch$ de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es insensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de 0.5 “N” haciendo que la orientación en los ángulos $Roll$ y $Pitch$ del extremo del Robot no pierda la precisión de la orientación movimiento.

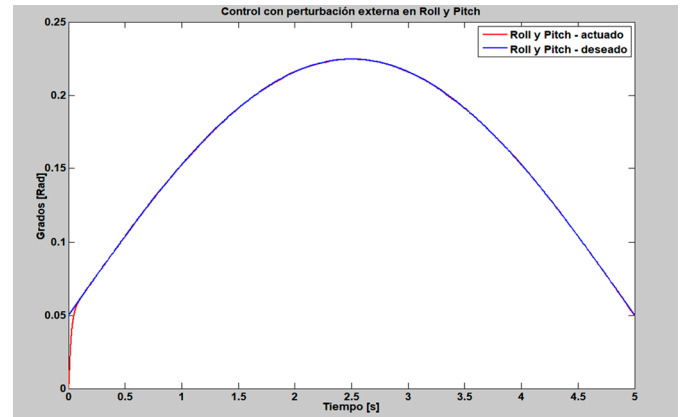


Figura 19. Control SMC con perturbación en la señal Roll y Pitch.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un controlador por modos deslizante para ser aplicado en un robot paralelo 3RPS. Para ello, se implementa las ecuaciones de la cinemática inversa del robot, mediante el principio de los trabajos virtuales, y el modelo dinámico inverso, que luego fue descrito en el modo variables de estados, utilizando el modelo linealizado. El modelo lineal fue validado utilizando otro modelo desarrollado en ADAMS. Una vez elaborado el modelo se realiza comparación entre un control clásico PID y el otro un control robusto MSC.

Para la comparación se utiliza una trayectoria tipo seno, como modelo simple de una trayectoria requerida para realizar conformación del metal por medio de línea de calentamiento. De igual forma, en la simulación se introducen perturbaciones, que pudieran representar la fuerza del viento mientras en mecanismo se utiliza en cubierta. Los resultados muestran que el control SMC provee los mejores resultados en todos los casos considerados. El modo deslizante resulta ser más rápido en su convergencia a cero, comparado con el PID. Otra ventaja vista con las gráficas es que el PID con la perturbación de máximo $1N$ en “PZ” el robot pierde la precisión de sus movimientos siendo totalmente sensible a las perturbaciones, lo que podría resultar en daños del robot, considerando que la tarea es de contacto. En las mismas condiciones, el SMC mostró que su precisión no se ve afectada.

Estos resultados muestran las grandes capacidades que tiene el control SMC para resolver problemas de control en el campo de la robótica industrial y en particular de la robótica paralela.

Este trabajo tiene como aporte la implementación del controlador por modos deslizantes en un robot paralelo de tres grados de libertad sometido a perturbaciones externas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se ha producido gracias a la Universidad Tecnológica de Panamá y SENACYT, por darme la oportunidad de estudiar esta Maestría. También agradezco a mi Asesora de tesis “Ilka Arelys Banfield”.

REFERENCIAS

- [1] M. Ishiyama, Y. Tango. "Advanced Line-Heating Process for Hull-Steel Assembly," *Journal of Ship Production* Vol. 16, No. 2, pp. 121-132, May 2000.
- [2] L.w. Tsay. "Solving the Inverse Dynamics of a Stewart-Gough Manipulator by The Principle of Virtual Work," *ASME Journal of Mechanical Design*. Vol. 122 pp. 3-9, Mar 2000.
- [3] C. D. Zhang, S.M. Song. "An Efficient Method for Inverse Dynamics of Manipulators based on the Virtual Work principle," *Journal of Field Robotics*, pp. 605-627, Jul 1993.
- [4] E. Yime, R. Saltaren, J. Diaz. "Forward and inverse dynamic model of the Stewart-Gough parallel robot in the task space," *Proceedings of the American Control Conference*. Jun 2010.
- [5] J. J. E. Slotine, W. Li. *Applied Nonlinear Control*. 1991, pp.70-126.
- [6] A. Koszewnik, K. Troc, M. Slowik. "Pid Controllers Design Applied to Positioning of Bal on the Stewart Platform," DOI 10.2478/ama. Jan 2014.
- [7] C. Yiqiang, Z. Dachang. "Position Analysis of 3-RPS Parallel Robot and Simulation of PID Control Based on Matlab Software," *Lecture notes in Information Technology*, Vol. 19, pp. 146, 2012.
- [8] M. Jafarinasab, M. Keshmiri, H. Azizan and M. Danesh. "Sliding mode control of a novel 6-DOF parallel manipulator with rotary actuators," 2011 16th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics, Miedzyzdroje, 2011, pp. 218-223.
- [9] V. I. Utkin. *Sliding Mode Control*. Control Systems, Robotics and Automation. Vol. XIII: 2009, pp.130.
- [10] C. Vecchio. "Sliding Mode Control: Theoretical Developments and Applications to Uncertain Mechanical Systems," PhD thesis, Università Degli Studi Di Pavia. 2008.
- [11] W. Lv, L. Tao, Z. Ji. "Sliding Mode Control of Cable-Driven Redundancy Parallel Robot with 6 DOF Based on Cable – Length Sensor Feedback," Volume 2017, Article ID 1928673, May 2017.
- [12] P.J. Prieto, N.R. Cazarez-Castro, L.T. Aguilar, D. Garcia. "Fuzzy Slope Adaptation for the Sliding Mode Control of a Pneumatic Parallel Platform," *Int. J. Fuzzy Syst.* 19, pp.167–178, Mar 2016.
- [13] H. S. Ramírez, M. Fliess. "A Sliding Mode Control APPROACH to Predictive Regulation," *Control Theory and Advanced Technology*, Vol.10 No.4, Part 3 pp.1297-1316, Sep. 1995.
- [14] C. I. Huang, C. Chang, M. Yu, L.Fu. "Sliding-Mode Tracking Control of the Stewart Platform," *5th Asian IEEE Control Conference*. Vol. 1, pp. 562-569, 2004.
- [15] J. Huspeka. "Second Order Sliding Mode Control of The DC Motor," *17Th International Conference on Process Control*, Jan.2009.
- [16] F. Moldoveanu. "Sliding Mode Controller Design for Robot Manipulator," *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, Vol. 7 (56), No. 2 Series I: Engineering Sciences, 2014.
- [17] W. Perruquetti, J. P. Barbot. *Sliding Mode Control in Engineering*, 2002, pp. 20-42.
- [18] P.R. Ouyang, J. Acob, V. Pano. "PD with sliding mode control for trajectory tracking of robotic system," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, Issue 2, pp.189-200, Apr 2014.
- [19] F. Piltan, S. Emamzadeh, Z. Hivand, F. Shahriyari, M. Mirzaei. "PUMA-560 Robot Manipulator Position Sliding Mode Control Methods Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate/Undergraduate Nonlinear Control, Robotics and MATLAB Courses," *International Journal of Robotic and Automation*, (IJRA), Vol (6), 2012.
- [20] F. Piltan, S. Rahmdel, S. Mehrara, R. Bayat. "Sliding Mode Methodology Vs. Computed Torque Methodology Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control Courses," *International Journal of Engineering (IJE)*, Vol. (6), 2012.
- [21] L.w. Tsay, *Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. 1999, pp. 437-439.
- [22] Y. Song, Y. Li, T. Huang. "Inverse Dynamics of 3-RPS Parallel Mechanism Based on Virtual Work Principle," *12th IFToMM World Congress*, Jun 2007.
- [23] M. Grotjahn, B. Heimann, H. Abdellatif. "Identification of Friction and Rigid-Body Dynamics of Parallel Kinematic Structures for Model-Based Control," *Multibody System Dynamics*, Vol. 11, pp 273–294, Apr 2004.
- [24] M. D. Rodriguez, V. Mata, N. Farhat, S. Provenzano. "Dynamic parameter identification of parallelrobots starting from the measurement of jointsposition and forces," *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 32, No. 2, Aug 2009.
- [25] E. Yime, R. Saltaren, J. Diaz. "Robust Adaptive Control of the Stewart-Gough Robot in the Task Space" *Proceedings of the American Control Conference*, Jun 2010.
- [26] V. Utkin, H. Lee. "Chattering Problem in Sliding Mode Control Systems," *International Workshop on Variable Structure Systems*, Jun 2006.