

Modelado y control cinemático de hexápodo de 18 grados de libertad

Gonzalo Romero Román*, Rodrigo Gonzalez (Asesor)*†

* Ingeniería Mecatrónica, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
Email: gonzaromero2007@gmail.com

† GridTICs, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina
Email: rodralez@frm.utn.edu.ar

Resumen—Los robots móviles son cada vez más utilizados en entornos domésticos e industriales. Los hexápodos son robots móviles con patas que permiten un movimiento omnidireccional y autónomo. Además, presentan un buen comportamiento en terrenos irregulares. En este informe se diseña e implementa el control de un hexápodo de 18 grados de libertad. Se modelan sus características en Simscape. Los resultados obtenidos muestran que el robot puede desplazarse correctamente entre dos puntos, rotar sobre su eje y satisfacer consignas de posición y orientación de su plataforma.

Palabras clave—Control cinemático, Hexápodo, Simscape

I. INTRODUCCIÓN

Los robots móviles con patas permiten la locomoción en terrenos inaccesibles para otros tipos de robots, dado que no necesitan una superficie de contacto continua. Así, puede sobrepasar obstáculos comparables con el tamaño de sus piernas. Además poseen una mayor movilidad y adaptabilidad en terrenos irregulares no estructurados y adopta diferentes tipos de pasos y velocidades de manera de mantener la estabilidad del sistema. Sin embargo, la coordinación de las patas y el control es más complejo que aquellos basados en ruedas debido al número de variables que deben ser monitoreadas. Los robots de seis patas dan una mayor confiabilidad dado que pueden continuar con el paso cuando una de sus patas falla y tienen menor impacto en el terreno por donde circulan. La capacidad de caminar en todas las direcciones y la posibilidad de llevar mayor cantidad de carga debido a su simetría axial hacen que sean muy usados.

Los hexápodos han sido ampliamente estudiados. En [1] se presenta una arquitectura de control jerárquica modelada en MapleSim. En [2] y [3] se realiza la simulación y control experimental en hexápodos de base rectangular. Mientras que en [4] se realiza el estudio de la cinemática directa. En [5] se presenta el análisis de la locomoción típica de un hexápodo simétrico. Un análisis más detallado del comportamiento del robot es realizado en [6].

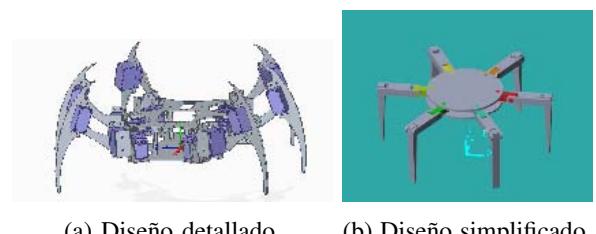
En este trabajo se realiza un análisis geométrico y funcional del robot para poder obtener las ecuaciones que permitieron generar el modelo necesario para la posterior simulación. Luego, se diseña el planificador de trayectorias para poder posicionar el hexápodo en valores deseado de abscisas y

ordenadas, así como en los ángulos de rotación requeridos. Por último, a partir de las simulaciones, se muestran los resultados obtenidos validando las ecuaciones calculadas.

II. ESTRUCTURA DEL ROBOT

La Figura 1a muestra la estructura del hexápodo. Se observan las partes y los accionamientos que conforman el robot. Para este tipo de robot móvil se requieren 18 actuadores. Se necesitan además la misma cantidad de sensores tipo *encoder* para poder realimentar la posición angular de cada actuador. Adicionalmente, se deben utilizar un acelerómetro y un giróscopo para poder regular la rotación de la base.

Para disminuir el tiempo de renderizado y por tanto aumentar la velocidad de compilación y simulación del robot se utilizó un diseño más minimalista. Este diseño se realizó en SolidWorks. Posteriormente, el modelo fue exportado a Matlab para la simulación. El modelo simplificado posee las mismas dimensiones que el modelo original por lo que las ecuaciones que describen los movimientos son equivalentes. Ambos modelos puede observarse en la Figura 1.



(a) Diseño detallado. (b) Diseño simplificado.

Figura 1: Diseños del hexápodo.

Cada pierna está compuesta por tres eslabones: el coxa, el fémur y la tibia. Esto puede observarse en la Figura 2. Por tanto, cada pata del robot requiere de tres actuadores.

Para modelar y simular el sistema se utilizó Simscape.

III. FUNDAMENTOS DEL ROBOT

III-A. Tipos de pasos

El ciclo de movimiento de cada pata está formado por dos partes: una fase de impulsión o movimiento donde la pierna pasa de una posición inicial a una posición final por

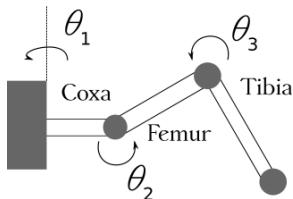


Figura 2: Diagrama esquemático de una pata del hexápedo.

el aire, y una fase de apoyo donde ésta pasa de una posición final a una posición inicial en contacto con el suelo. La combinación de estos movimientos en cada una de las patas permite el desplazamiento del centro de masa del hexápedo. Este comportamiento puede observarse en la Figura 3, donde la linea azul es el movimiento durante la fase de impulsión, mientras que la linea roja es el movimiento durante la fase de apoyo.

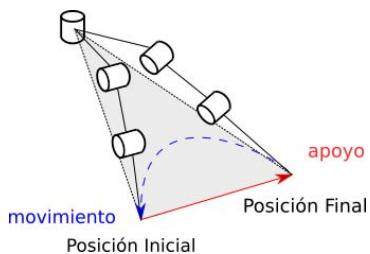


Figura 3: Fases de movimiento y de apoyo.

Existen distintos tipos de pasos que pueden ser utilizados durante el movimiento del hexápedo. Esto depende de si son una, dos o tres patas las que se encuentran en cada instante en fase de impulsión. En caso de que sean tres las patas en fase de impulsión y tres en fase de apoyo, el tipo de paso se denomina *tripod gait*, siendo éste el paso más rápido pero el más inestable, dado que en cada momento se encontrarán solo tres patas tocando el suelo.

III-B. Cinemática inversa

Dos tipos de análisis pueden realizarse. Uno consiste en considerar que en todo momento la plataforma es paralela al suelo, simplificando en gran medida la solución. De esta manera, la cinemática de las patas se puede resolver a partir de métodos geométricos. El otro tipo de análisis consiste en considerar que la plataforma puede moverse libremente. Si bien el cálculo es más complejo y el costo computacional mayor, permite generalizar el movimiento del hexápedo y realizar trayectorias más complejas. Se realiza el primer análisis considerando que en todo momento la plataforma es paralela al piso lo que simplifica el problema del cálculo de la cinemática de un robot serie. A partir de la Figura 4 se obtiene,

$$x_0 = x - l_1 \cos \theta_1, \quad (1)$$

$$y_0 = y - l_1 \sin \theta_1, \quad (2)$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{y_0}{x_0} \right). \quad (3)$$

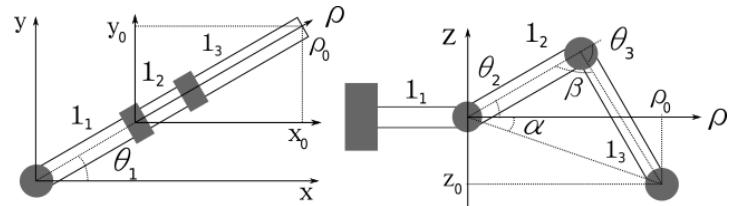


Figura 4: Cálculo de la cinemática inversa mediante el método geométrico, vista superior y lateral de una pierna.

Usando la ley del coseno pueden obtenerse las demás variables articulares. Se obtendrán dos soluciones: codo arriba y codo abajo. Dado que se pretende que en todo momento sea la misma cara de la base la que enfrente el suelo, se considera como única solución el codo arriba.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right), \quad (4)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2}{-2l_2l_3} \right), \quad (5)$$

$$\theta_2 - \alpha = \arccos \left(\frac{-l_3^2 + l_2^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}{2l_2\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right), \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{-l_3^2 + l_2^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}{2l_2\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) \quad (7)$$

$$+ \arctan \left(\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right).$$

La tercera variable articular está dada por,

$$\theta_3 = -(\pi - \beta) = -\arccos \left(\frac{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right). \quad (8)$$

Sin embargo en algunas ocasiones es necesario que el robot mantenga una cierta orientación mientras camina o mientras se encuentre parado. Esto puede ocurrir en el caso de que el robot tenga que caminar en un terreno con orientación específica, o deba mantener una configuración horizontal. Para este caso debe calcularse la cinemática inversa del robot paralelo. El sistema de coordenadas de cada una de las patas y de la base puede observarse en la Figura 5.

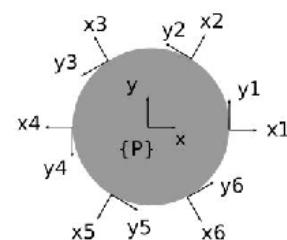


Figura 5: Sistemas coordinados de cada pata y de la base.

Para resolver la cinemática inversa del robot, se define un sistema coordenado fijo al suelo definido como X, Y, Z

así como un sistema coordenado local fijo al centro de la plataforma x, y, z . Dado que todas las piernas son idénticas, la cinemática inversa se calcula para una sola pierna y luego es generalizada para las demás. La cinemática inversa expuesta en [6], puede ser adaptada para tener en cuenta el sistema de referencia utilizado.

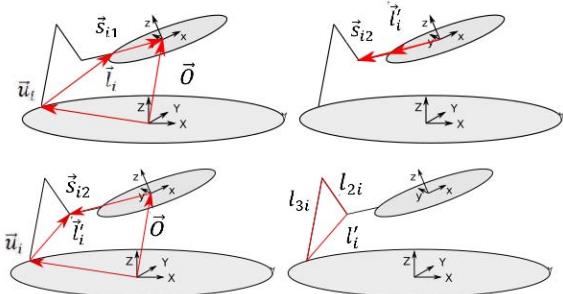


Figura 6: Cinemática inversa de la plataforma.

A partir de la Figura 6-a puede observarse que,

$$\bar{l}_i = \bar{O} + R \bar{s}_{i1} - \bar{u}_i. \quad (9)$$

Donde \bar{O} es el vector posición desde el origen del sistema de referencia fijo al suelo al sistema de referencia fijo a la plataforma; \bar{s}_{i1} representa la posición de la articulación del coxa con respecto al sistema de referencia fijo a la plataforma; \bar{u}_i es el punto de contacto de la pierna i con respecto al sistema de referencia fijo al suelo O ; \bar{l}_i es el vector que va desde el punto de contacto a la articulación de la cadera; y R es la matriz de rotación de la plataforma con respecto al sistema coordenado fijo al suelo. R puede ser calculada a partir de los ángulos de Euler *roll*, *pitch* y *yaw*.

A partir de \bar{l}_i puede obtenerse $\theta_1 i$ como,

$$\theta'_{1i} = \arctan \left(\frac{l_{i,Y}}{l_{i,X}} \right). \quad (10)$$

Donde $l_{i,X}$ y $l_{i,Y}$ son las proyecciones del vector \bar{l}_i sobre los ejes X e Y del sistema coordenado fijo al suelo.

A partir de θ'_{1i} se puede obtener θ_{1i} corrigiendo los ángulos a partir del desfasaje con respecto al centro de coordenadas fijo al centro de la plataforma,

$$\theta_{1i} = \theta'_{1i} - \frac{\pi}{3} i. \quad (11)$$

El vector que va desde el centro de la plataforma a la posición de la segunda articulación \bar{s}_{i2} puede obtenerse a partir de la longitud del primer eslabón l_{1i} , y el vector que va desde dicho centro a la posición del primer eslabón \bar{s}_{i1} , como se muestra en la Figura 6-b.

$$\bar{s}_{i2} = \begin{pmatrix} s_{i1x} & l_{1i} \cos(\theta_{1i}) \\ s_{i1y} & l_{1i} \sin(\theta_{1i}) \\ s_{i1z} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

El siguiente paso consiste en encontrar el vector que va desde el punto de contacto de la pierna i con el piso hasta la posición de la segunda articulación \bar{l}'_i . Esto puede observarse en la Figura 6-c. Entonces,

$$\bar{l}'_i = \bar{O} + R \bar{s}_{i2} - \bar{u}_i. \quad (13)$$

A partir de la Figura 6-d se puede obtener el valor de las demás variables articulares siendo l_{2i} y l_{3i} las longitudes de la fémur y la tibia del robot, respectivamente.

La Figura 7 muestra los ángulos que intervienen en el cálculo de la cinemática inversa del robot.

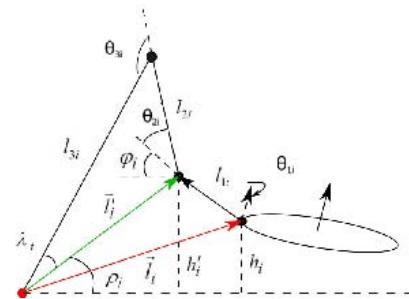


Figura 7: Cálculo de las variables articulares.

Observando la Figura 7, se pueden obtener los valores de los ángulos como,

$$\cos(\lambda_i) = \frac{l_i'^2 + l_{3i}^2 - l_{2i}^2}{2l_i'l_{3i}}, \quad (14)$$

$$\cos(\pi - \theta_{3i}) = \frac{l_{2i}^2 + l_{3i}^2 - l_i'^2}{2l_{2i}l_{3i}}, \quad (15)$$

$$\cos(\theta_{2i} + \rho_i + \phi_i) = \frac{l_{2i}^2 + l_i'^2 - l_{3i}^2}{2l_{2i}l_i'}, \quad (16)$$

$$\rho_i = \arctan \left(\frac{h'_i}{\sqrt{l_{i,X}^2 + l_{i,Y}^2}} \right), \quad (17)$$

$$\phi_i = \arcsin \left(\frac{h'_i}{l_{1i}} \right). \quad (18)$$

Por lo tanto, las ecuaciones que corresponden a la segunda y tercera variables articulares están dadas por,

$$\theta_{2i} = \arccos \left(\frac{l_{2i}^2 + l_i'^2 - l_{3i}^2}{2l_{2i}l_i'} \right) (\rho_i + \phi_i), \quad (19)$$

$$\theta_{3i} = \pi - \arccos \left(\frac{l_{2i}^2 + l_{3i}^2 - l_i'^2}{2l_{2i}l_{3i}} \right). \quad (20)$$

Se obtiene de esta forma la cinemática inversa del robot paralelo.

III-C. Rotación

El desplazamiento que debe realizar la pierna para producir un incremento de ángulo $d\alpha$ puede observarse en la Figura 8.

Sea $d\alpha$ el incremento de ángulo, dp el desplazamiento con respecto al sistema de referencia de la pierna para generar

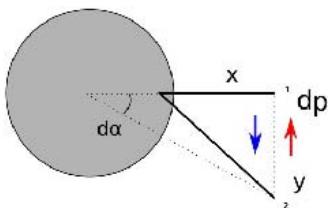


Figura 8: Rotación del hexápedo.

dicho incremento, r_b el radio de la plataforma del robot y l_x la distancia en x del efecto final con respecto al sistema de referencia de la pata. Entonces puede obtenerse la siguiente relación,

$$dp = (l_x + r_b) \tan(d\alpha). \quad (21)$$

Los incrementos en x e y de cada pierna con respecto a su sistema de referencia pueden obtenerse como,

$$dx_i = 0, \quad (22)$$

$$dy_i = dp. \quad (23)$$

III-D. Traslación

Para realizar la traslación del robot se utiliza el tipo de paso *tripod gait*. En la Figura 9 se muestra un diagrama esquemático del paso, donde L es la magnitud del desplazamiento que debe realizar el robot en un ciclo de desplazamiento y β es el factor de tarea, es decir, la relación de la fase de apoyo con respecto al ciclo de desplazamiento que, para el caso de un *tripod gait*, es $\beta = 0,5$.

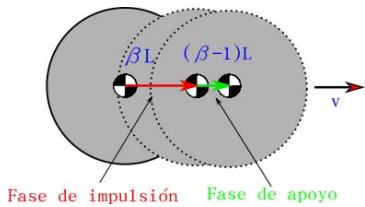


Figura 9: Traslación del hexápedo.

En un ciclo de desplazamiento cada pierna debe realizar una fase de desplazamiento y una fase de impulsión. Una vez finalizado dicho ciclo cada una de las patas se encuentra en la misma posición y orientación espacial con respecto al sistema de referencia fijo a la plataforma, pero se ha desplazado con respecto al sistema de referencia fijo al suelo. El enfoque implementado cuando el robot se desplaza en una trayectoria curva consiste en que el robot se mueva diagonalmente en función de la trayectoria requerida manteniendo su orientación inicial. Este enfoque permite una mayor velocidad de desplazamiento dado que el robot no debe detenerse cada vez que se presente una curva. Sea dX y dY la proyección del desplazamiento que debe realizar el robot en un ciclo de desplazamiento L sobre los ejes del sistema fijo al suelo, sea α la rotación del hexápedo con respecto al mismo sistema de referencia y sea i el número de pata. Entonces el desplazamiento que debe

realizar cada pata con respecto a sus sistemas de referencia está dado por las siguientes ecuaciones.

$$dx_i = dX \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}(i-1)\right) + dY \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}(i-1)\right), \quad (24)$$

$$dy_i = dY \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}(i-1)\right) - dX \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}(i-1)\right). \quad (25)$$

Estos valores corresponden a los desplazamientos que deben realizarse durante el ciclo de trabajo. Los desplazamientos en la fase de apoyo e impulsión corresponden a la mitad de las dichas magnitudes.

IV. ARQUITECTURA DE CONTROL

La arquitectura de control del hexápedo puede verse en la Figura 10. A partir de una consigna de trayectoria y en función de las variables medidas por los sensores, se envían las señales a los actuadores para que el robot se ubique en la posición y orientación deseada.

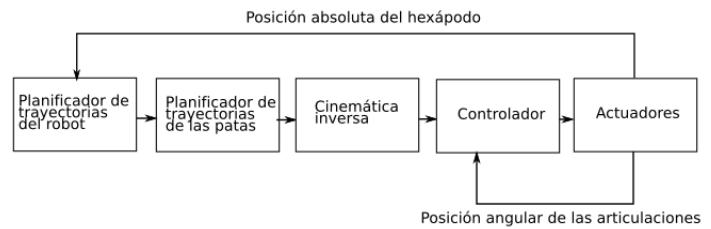


Figura 10: Arquitectura de control.

IV-A. Planificador de trayectorias del robot

El planificador de trayectorias del robot tiene como objetivo definir los desplazamientos que deben realizarse y corregir su posición en función de los valores obtenidos por los sensores de posición absoluta del robot. La cantidad de pasos que deben efectuarse, su longitud y velocidad deben ser determinados por dicho planificador. Los valores de los sensores son tomados con un periodo definido con el objetivo de reducir al mínimo la diferencia entre el valor medido y el valor deseado. La corrección de errores se realiza en el mismo periodo. Se compara el valor deseado en un tiempo t_{i+1} con el valor medido en t_i para dar la consigna para obtener el valor deseado en t_{i+1} .

Dado que el hexápedo debe volver a su posición inicial con respecto al sistema de referencia fijo a la plataforma luego de cada paso, los pasos deben ser calculados en función de la posición esperada en un instante de tiempo posterior, y en función de los valores medidos y de consigna en un tiempo actual. Se utiliza un controlador PI con el objetivo de reducir la diferencia entre dichos valores. Dichas diferencias pueden producirse debido al resbalamiento del robot o a otros factores que puedan afectar la trayectoria de éste. A partir de la salida del controlador PI se calculan las trayectorias a realizar. Se usaron ganancia $K_p = 1$ y $K_i = 0,1$ y un periodo de muestreo $T_{pi} = 1s$. La información obtenida es llevada al planificador

de trayectorias de las patas el cual genera el vector de variables articulares que debe satisfacer el hexápodo.

IV-B. Planificador de trayectorias de las patas

El planificador de trayectorias de las patas tiene como objetivo generar los pasos del hexápodo, es decir, definir los valores de posición en x , y y z que tomarán cada una de las piernas del robot en función de las distancias requeridas y los tiempos necesarios provistos por el planificador del robot. Una vez calculado los vectores de variables cartesianas y sus vectores de tiempo correspondiente, éstos son almacenados en un arreglo de datos más grande que posteriormente será llevados al bloque de cinemática inversa para poder dar consignas a los actuadores. Si suponemos que las piernas impares comienzan con la fase de impulsión y las pares con la fase de apoyo, las salidas del planificador serán para las piernas impares,

$$l_{ix} = (x_0, \quad x_0 + \frac{dx_i}{4}, \quad x_0 + \frac{dx_i}{2}, \quad x_0 + \frac{dx_i}{4}, \quad x_0), \quad (26)$$

$$l_{iy} = (y_0, \quad y_0 + \frac{dy_i}{4}, \quad y_0 + \frac{dy_i}{2}, \quad y_0 + \frac{dy_i}{4}, \quad y_0), \quad (27)$$

$$l_{iz} = (z_0, \quad z_0 + h, \quad z_0, \quad z_0, \quad z_0). \quad (28)$$

Y para las piernas pares,

$$l_{ix} = (x_0, \quad x_0 + \frac{dx_i}{4}, \quad x_0 + \frac{dx_i}{2}, \quad x_0 + \frac{dx_i}{4}, \quad x_0), \quad (29)$$

$$l_{iy} = (y_0, \quad y_0 + \frac{dy_i}{4}, \quad y_0 + \frac{dy_i}{2}, \quad y_0 + \frac{dy_i}{4}, \quad y_0), \quad (30)$$

$$l_{iz} = (z_0, \quad z_0, \quad z_0, \quad z_0 + h, \quad z_0). \quad (31)$$

Donde l_i son las coordenadas cartesianas que debe tomar la i -ésima pierna en función del tiempo, h es la altura a la que sube la pierna durante la fase de impulsión y dx_i y dy_i son los valores de desplazamiento de las piernas calculados en la sección de traslación. Dichos vectores están asociados a un vector de tiempo que especifican el momento donde deben realizarse dichas acciones.

IV-C. Controlador

Para hacer que las trayectorias seguidas por las patas del robot sean lo más parecidas posible a las trayectorias calculadas por el planificador, se utiliza un control multiarticular. Éste hace uso del conocimiento sobre la dinámica inversa para desacoplar el sistema. El modelo dinámico de cada pierna del robot está dado por la siguiente ecuación,

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + F(\dot{\theta}) + G(\theta) + J^T f. \quad (32)$$

Donde θ es el vector de coordenadas generalizadas, y $\dot{\theta}$ y $\ddot{\theta}$ sus derivadas. M es la matriz de inercia, C la matriz de Coriolis y de efectos centrífugos, F es la matriz de fricción, G es la matriz de gravedad, J es el jacobiano del manipulador y f es el vector que describe la fuerza aplicada en el efector final. El valor de dichas matrices puede ser obtenido fácilmente utilizando el método de Newton-Euler [7]. Debido a que las ecuaciones resultantes son muy extensas no se han agregado al presente informe.

El objetivo del control multiarticular es encontrar una ley de control no lineal tal que cuando se reemplace en la ecuación

precedente resulte en un lazo de control lineal. Si elegimos una ley de control tal que,

$$\tau = M(\theta)a_\theta + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + F(\dot{\theta}) + G(\theta) + J^T f. \quad (33)$$

Dado que la matriz de inercia es invertible, entonces,

$$\ddot{\theta} = a_\theta, \quad (34)$$

donde a_θ representa la nueva entrada al sistema. El nuevo sistema es lineal y desacoplado. Como en la práctica no se tiene un modelo dinámico preciso del robot, se producirá una diferencia entre las posiciones y velocidades deseadas y reales. Esta diferencia puede tomarse como una perturbación. Otras perturbaciones pueden ser producidas por colisiones durante la operación. Por lo tanto cada componente del vector a_θ debe ser diseñada para controlar el sistema lineal. Se utiliza para esto un controlador PID, por lo tanto se obtiene que,

$$a_\theta = \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta) + K_i \int_0^t (\theta_d - \theta) dt. \quad (35)$$

K_p , K_v y K_i son matrices diagonales conformadas por ganancias proporcionales, derivativas e integrales respectivamente. $\ddot{\theta}_d$, $\dot{\theta}_d$ y θ_d son consignas de aceleración, velocidad y posición. Si $e = \theta - \theta_d$ es posible demostrar a partir de las anteriores ecuaciones que el sistema de lazo cerrado está caracterizado por la ecuación de error,

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int_0^t e dt = 0. \quad (36)$$

Una opción para obtener las ganancias consiste en usar matrices que permitan obtener una respuesta críticamente amortiguada. Se ubican los todos polos del sistema sobre el eje real negativo a una frecuencia de 100 rad/s, lo que permite obtener respuestas rápidas sin esfuerzos de control excesivos. Se obtienen, entonces, matrices diagonales con valores $K_{vjj} = 300$, $K_{pj} = 30e3$ y $K_{ijj} = 1e6$.

Se utilizan una frecuencia de muestreo de 320 Hz, la cual es veinte veces superior a la frecuencia natural del sistema.

V. RESULTADOS

Primero se evalúa el comportamiento del controlador PID implementado usando la frecuencia de muestreo previamente estipulada. Se utilizó el solver *ode15s* de Matlab. Se toma una pierna del hexápodo y se la hace desplazar en un ciclo típico de desplazamiento. En el tiempo en el que la pierna se encuentra en contacto con el suelo se le aplica un torque de perturbación constante de $\tau_p = 1,5[N.m] = 15,31[kg.cm]$ a cada articulación debido a la acción de contacto con el suelo. Si bien dicha fuerza de contacto debería estar contenida en el modelo dinámico previamente desacoplado y solo las diferencias en el modelo dinámico teórico y real deberían ser manejadas por el controlador, se realiza de este modo para facilitar la

evaluación del comportamiento del lazo PI ante perturbaciones externas desfavorables. Se utilizaron interpoladores de quinto orden para unir los puntos de las trayectorias de las patas.

Los errores entre las posiciones angulares de referencia y medidas pueden observarse en la Figura 11. Se grafican las posiciones medidas en rojo y las de referencias en azul. Puede observarse un correcto funcionamiento del lazo de control implementado.

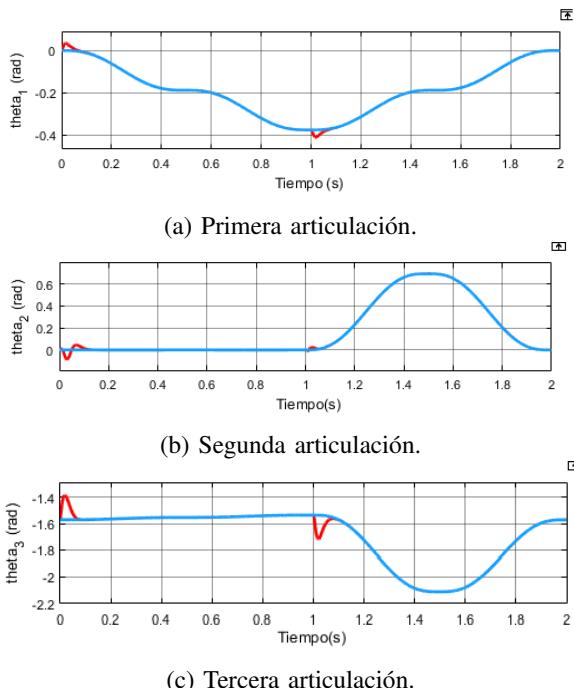


Figura 11: Posiciones angulares medidas (rojo) y de referencia (azul).

Los esfuerzos de control pueden verse en la Figura 12. Se observa que no se producen sobrepicos demasiado elevados de torque, por lo que las acciones de control son apropiadas.

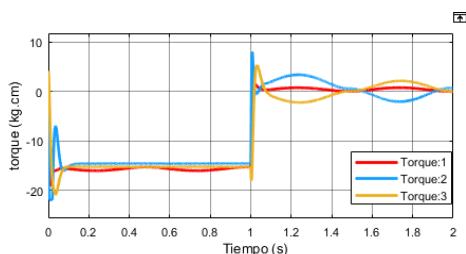
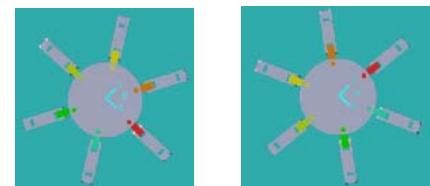


Figura 12: Acciones de control.

Se procede a realizar una rotación del robot para verificar el lazo PI de control, el cual se utiliza para mitigar las perturbaciones debidas a resbalamientos del robot. Se hace rotar al robot un ángulo $\alpha = \frac{\pi}{2}$ en un tiempo $t = 10s$. Se introduce un resbalamiento que permite observar la acción de control. La simulación obtenida puede observarse en la Figura 13.

La acción del control PI sobre el ángulo de rotación puede observarse en la Figura 14. En color rojo se representa los valores obtenidos y en color azul el valor deseado.



(a) Posición angular en $t = 0s$. (b) Posición angular en $t = 10s$.

Figura 13: Rotación del robot.

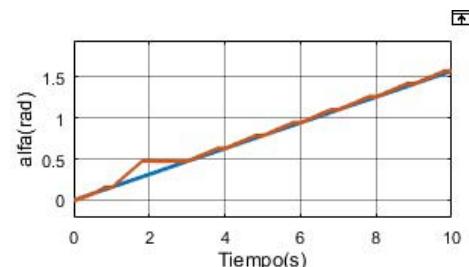


Figura 14: Ángulo de rotación esperado (azul) y medido (rojo).

En la Figura 15 puede verse los distintos movimientos de los ángulos de roll, pitch y yaw validando la cinemática calculada.



(a) Yaw. (b) Pitch. (c) Roll

Figura 15: Roll-Pitch-Yaw.

VI. CONCLUSIÓN

El presente expone los fundamentos y cinemática de un robot hexápedo de 18 grados de libertad. Se desarrolla una arquitectura de control para que el robot pueda rotar y desplazarse en función de las consignas definidas por el usuario. Los resultados obtenidos validan los modelos utilizados y muestran un buen comportamiento del robot ante perturbaciones externas.

REFERENCIAS

- [1] C. S. Gurel, "Hexapod modelling, path planning, and control," *University of Manchester*, 2009.
- [2] M. Sorin and M. Niñulescu, "Hexapod robot leg dynamic simulation and experimental control using matlab," *FAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2012.
- [3] D. Thilderkvist and S. Svensson, "Motion control of hexapod robot using model-based design," *Department of Automatic Control, Lund University*, 2015.
- [4] M. Ghayour and A. Zareei, "Direct kinematic analysis of a hexapod spider-like mobile robot," *Trans Tech Publications*, 2011.
- [5] Z. Wang, X. Ling, and A. Rovetta, "Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot," *Cambridge University Press*, 2009.
- [6] M. M. A. Hajabadi, "Analytical workspace, kinematics, and foot force based stability of hexapod walking robots," *Worcester Polytechnic Institute*, 2013.
- [7] J. J. Craig, *Robótica*. Pearson, 2006.