

Diseño e Implementación de una Plataforma Robótica Móvil Inalámbrica con Tracción Intercambiable para el Laboratorio de Mecatrónica de la ESPE-L

Paúl Tinizaray, Ernesto Santillán, Marco Singaña,

Departamento de Energía y Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, Ecuador

contacto@proyectosmecatronicos.com

ersantillan@espe.edu.ec

masingania@espe.edu.ec

Resumen.- El objetivo de este proyecto fue desarrollar un robot móvil capaz de desplazarse eficientemente en ambientes interiores y exteriores gracias a la integración de dos sistemas de locomoción: ruedas y orugas. El pilar fundamental del diseño del robot fue el modelado cinético del robot en diferentes escenarios, que aportó los datos de entrada para el dimensionamiento de los actuadores, el diseño del módulo mecánico y el módulo de control. Como resultado de las pruebas realizadas se concluyó que la configuración de orugas desarrollada es superior a la configuración de ruedas en interiores y exteriores.

Palabras clave.- Robot móvil, análisis cinético, Arduino, Python

Abstract.- The aim of this project was to develop a mobile robot capable of moving efficiently through outdoors and indoors thanks to the integration of two locomotion systems: wheels and tracks. The main of the project was the development of robot's kinetic model in different stages which contributed input data for actuators sizing, mechanical module design and control module design. The conducted test allowed to conclude that the tracks configuration was better than wheels configuration in both indoors and outdoors.

I. ESTADO DEL ARTE

Existen numerosos robots móviles comerciales capaces de conducirse satisfactoriamente en ambientes difíciles; la Tabla 1 muestra algunos ejemplos.

Tabla 1. Características de diferentes robots todoterreno comerciales

| Robot | Locomoción | Huella (mm) | Masa (kg) | Carga útil (kg) | Velocidad (m/s) |
|----------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Seekur Jr. [1] | Ruedas | 425 | 77 | 40 | 1,20 |
| MMP-40 (tracked) [2] | Orugas | 686 | 18 | 13 | 0,73 |
| LT2 [3] | Orugas | 686 | 20 | - | 1,52 |
| MegaBot [3] | Ruedas | 787 | 80 | 68 | 3,35 |
| Jaguar Lite [4] | Orugas | 640 | 13,50 | 13 | 2,00 |
| Packbot [5] | Orugas | 686 | 11 | - | 2,60 |
| Talon [6] | Orugas | 864 | 39 | 136 | 1,80 |

En el campo académico, varios investigadores han construido robots similares a los mencionados en la Tabla 1. El principal aporte de estos trabajos fue el desarrollo de modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de los robots en diferentes circunstancias, siendo la más importante en la que robot se desplaza sobre gradas. Liu et al analizan la habilidad para subir gradas de un robot modular reconfigurable de orugas en tres fases: ascenso del escalón, cruce del primer escalón y desplazamiento sobre las puntas de las gradas [8]. Tao et al modelan el comportamiento de un robot móvil de orugas mientras se desplaza sobre gradas en cuatro fases: el

robot toca el primer escalón, el robot sube el primer escalón, el robot sube por las gradas y el robot abandona las gradas [9]. Rastan desarrolla el modelo dinámico de un escalador de gradas de geometría fija mientras asciende y desciende gradas en 18 fases [10]. El trabajo de Rastan es particularmente importante debido a que sus conclusiones son tomadas como punto de partida de este proyecto.

II. MODELAMIENTO

A. Selección de la morfología

El robot fue ideado para desplazarse en los alrededores del laboratorio de Mecatrónica de la ESPE-L; este puede considerarse un ambiente urbano. Rastan concluye que el tipo de robot más adecuado para la navegación en ambientes urbanos es el de geometría fija de orugas; sin embargo, señala que una combinación de ruedas y orugas podría mejorar la utilidad del robot [10]. Siguiendo la recomendación de Rastan, se selecciona una configuración de geometría fija y tracción intercambiable entre ruedas y orugas para el robot.

El comportamiento más complejo del robot se presenta durante el desplazamiento sobre gradas; este desplazamiento se logra únicamente con orugas por lo que se le da prioridad a esta configuración. La Figura 1 muestra algunas dimensiones relevantes de un escalador de orugas: L es la huella de la oruga, x_G es la coordenada horizontal del centro de gravedad medida desde la parte posterior de la huella en un sistema de referencia solidario al robot, y_G es la coordenada vertical del centro de gravedad y r es el radio de las ruedas.

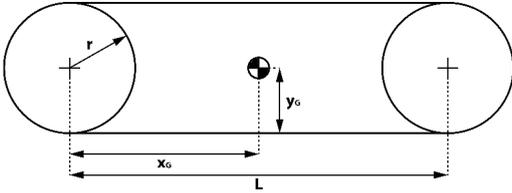


Figura 1. Dimensiones relevantes de un escalador de geometría fija.

B. Restricciones geométricas

Existen dos restricciones fundamentales en los escaladores de gradas. La primera determina la longitud de la huella de la oruga y está dada por la siguiente ecuación [8]:

$$L \geq 2 * \sqrt{T^2 + A^2} \quad (1)$$

Donde:

T es la huella de la grada (m).

A es la longitud de la contrahuella (m).

La segunda restricción determina la ubicación de la coordenada horizontal del centro de gravedad del robot y está dada por la siguiente ecuación:

$$x_G = \sqrt{T^2 + A^2} + y_G * \frac{T}{A} \quad (2)$$

C. Fase 1: el robot alcanza el primer escalón

Esta fase inicia cuando el robot alcanza la contrahuella del primer escalón y termina cuando la huella de la oruga alcanza la punta del primer escalón. La Figura 2 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante esta fase. Para simplificar los cálculos se asume que las fuerzas mantienen la dirección mostrada durante toda la fase.

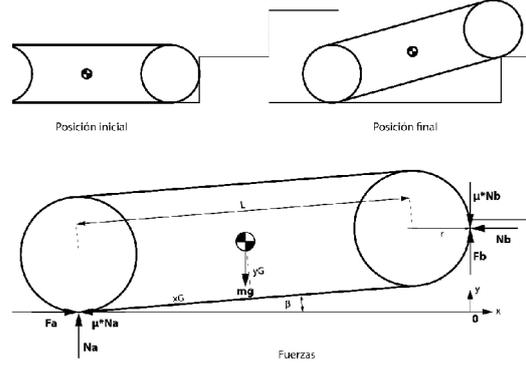


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre del robot durante la fase 1.

Las ecuaciones dinámicas de la plataforma durante la fase 1 se muestran a continuación:

$$\sum F_x = m * \ddot{x}$$

$$F_A - \mu_A * N_A - N_B = m * \ddot{x} \quad (3)$$

$$\sum F_y = m * \ddot{y}$$

$$N_A - F_B - \mu_B * N_B - m * g = m * \ddot{y} \quad (4)$$

$$\sum M_O = J * \ddot{\beta}$$

$$-N_A * (L * \cos \beta + r) + m * g \quad (5)$$

$$* [(L - x_G) * \cos \beta + r] + N_B$$

$$* (L * \sin \beta + r) = J * \ddot{\beta}$$

Si se asume que la aceleración $\ddot{\beta}$ es constante, su valor y el de las aceleraciones \ddot{x} y \ddot{y} vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\ddot{\beta} = \frac{2 * \beta}{t^2} \quad (6)$$

Donde:

β es el desplazamiento realizado (rad).

t es la variación del tiempo (s).

$$\ddot{x} = (L - x_G) * (\cos \beta * \ddot{\beta}^2 + \sin \beta * \ddot{\beta}) \quad (7)$$

$$\ddot{y} = x_G * (-\sin \beta * \dot{\beta}^2 + \cos \beta * \ddot{\beta}) \quad (8)$$

Donde:

$$\dot{\beta} = \ddot{\beta} * t \quad (9)$$

El valor de β corresponde al desplazamiento realizado desde la posición inicial a la posición. El valor t es el tiempo que quiera dársele al robot para ejecutar el movimiento.

El sistema formado por las ecuaciones (3) a (8) posee seis ecuaciones y siete incógnitas por lo que su solución es aproximada. La Tabla 2 muestra las constantes del entorno y del robot utilizadas en el análisis cinético de esta fase. La Figura 3 muestra los resultados del análisis.

Tabla 2. Constantes del entorno y del robot utilizadas durante la fase 1, fase 2 y fase 3.

| Constante | Símbolo | Valor |
|--|---------|-------|
| Contrahuella de grada (m) | T | 0,20 |
| Contrahuella de grada (m) | A | 0,30 |
| Coefficiente de rodadura del robot sobre las gradas | μ | 0,160 |
| Aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$) | g | 9,81 |
| Huella de la oruga (m) | L | 0,72 |
| Masa total (kg) | m | 30,00 |
| Radio de la rueda (m) | r | 0,12 |
| Coordenada y del centro de gravedad (m) | x_G | 0,12 |
| Coordenada x del centro de gravedad (m) | y_G | 0,44 |
| Momento de inercia respecto al punto 0 ($k * m^2$) | J | 13,11 |
| Variación del tiempo (s) | t | 1,00 |
| Desplazamiento angular (rad) | β | 0,27 |

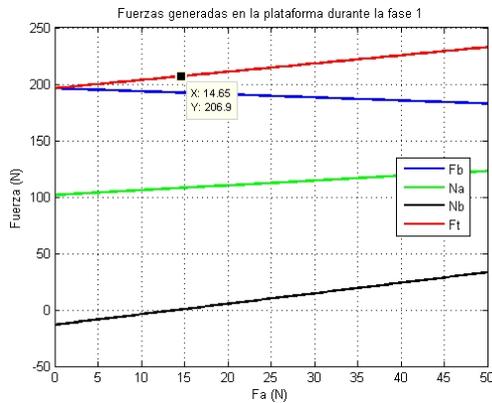


Figura 3. Resultados del análisis cinético de la fase 1.

En la Figura 3 los valores de las fuerzas comienzan a corresponderse con el diagrama de cuerpo libre de la Figura 2

desde que F_A vale 15 N. Puesto que N_B no puede tener un valor igual o cercano a cero, la fuerza total requerida por el robot debe ser mayor a 206,9 N y la fuerza necesaria en cada motor superior a 103,45 N.

D. Fase 2: el robot asciende por el primer escalón

La fase 2 comienza cuando la huella de la oruga toca la punta de la primera grada y termina cuando la huella de la oruga coincide con la pendiente de las gradas. La Figura 4 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 2 del escalamiento.

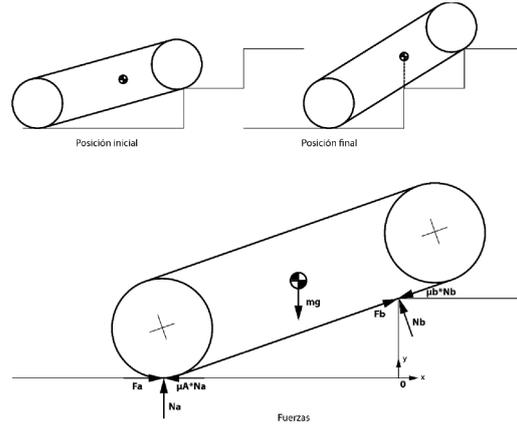


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del robot durante la fase 2.

En la Figura 4, F_A y F_B son componentes de la fuerza transmitida por la oruga. Para facilitar los cálculos en esta fase es posible obviar, indistintamente, una de las dos componentes; se decide no tomar en cuenta a F_B . La fuerza requerida por la plataforma es máxima en la posición final. Las ecuaciones dinámicas de la plataforma durante la fase 2 se muestran a continuación:

$$\sum F_x = m * \ddot{x}$$

$$F_A - \mu_A * N_A - \mu_B * N_B * \cos \beta - N_B * \sin \beta = m * \ddot{x} \quad (10)$$

$$\sum F_y = m * \ddot{y}$$

$$N_A + N_B * \cos \beta - \mu_B * N_B * \sin \beta - m * g = m * \ddot{y} \quad (11)$$

$$\sum M_0 = J * \ddot{\beta}$$

$$(\mu_B * N_B * \cos \beta + N_B * \sin \beta) * T - N_A * \frac{T}{\tan \beta} = J * \ddot{\beta} \quad (12)$$

La velocidad angular $\dot{\beta}$ y la aceleración $\ddot{\beta}$ se calculan como en la fase anterior, los valores de las aceleraciones \ddot{x} y \ddot{y} vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\ddot{x} = \left(x_G * \cos \beta + 2 * T * \frac{(\tan \beta^2 + 1)^2}{\tan \beta^3} - 2 * T * \frac{\tan \beta^2 + 1}{\tan \beta} \right) * \beta^2 + \left(x_G * \sin \beta - T * \frac{\tan \beta^2 + 1}{\tan \beta^2} \right) * \ddot{\beta} \quad (13)$$

$$\dot{y} = x_G * (-\sin \beta * \beta^2 + \cos \beta * \ddot{\beta}) \quad (14)$$

El sistema formado por las ecuaciones (6) y (10) a (14) posee seis ecuaciones y seis incógnitas por lo que es posible hallar una única solución. Las constantes del entorno y del robot para esta fase son las de la Tabla 2 con excepción de los valores del tiempo (t) y el desplazamiento angular (β) que fueron sustituidos por 5 y 0,371 respectivamente. La fuerza requerida por cada motor en esta fase es 97,72 N.

E. Fase 3: el robot se desplaza sobre las escaleras

La Figura 5 muestra el diagrama de cuerpo del robot durante la fase 3 del escalamiento.

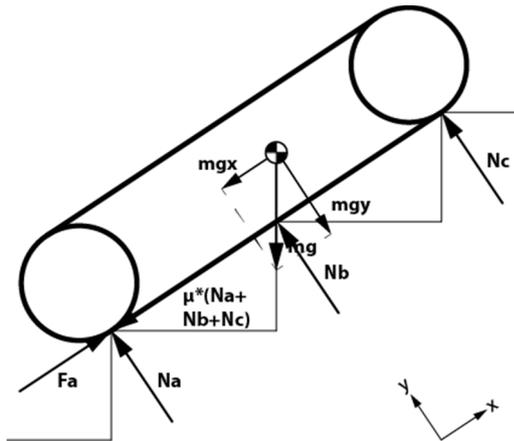


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre del robot durante la fase 3.

Durante esta fase la plataforma experimenta movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. El valor de la aceleración depende del comportamiento que se le desee dar al robot; para este proyecto se selecciona una aceleración de $0,1 \frac{m}{s^2}$.

La ecuación que permite conocer la fuerza total requerida es:

$$F = m * a + m * g * \sin \beta + \mu * m * g * \cos \beta \quad (15)$$

Las constantes del entorno y del robot para esta fase son las de la Tabla 2. La fuerza requerida para ejecutar el movimiento es entonces 195,87 N; la fuerza en cada motor es 97,93 N.

F. Rotación del robot

Durante la rotación del robot se producen tres momentos: un momento a favor del movimiento generado por la acción de los motores en las orugas, un momento en contra del movimiento generado por la resistencia a la rodadura de las orugas y un momento en contra del movimiento generado por la resistencia de las orugas a desplazarse lateralmente [11]. La figura muestra el diagrama de cuerpo libre del robot cuando rota.

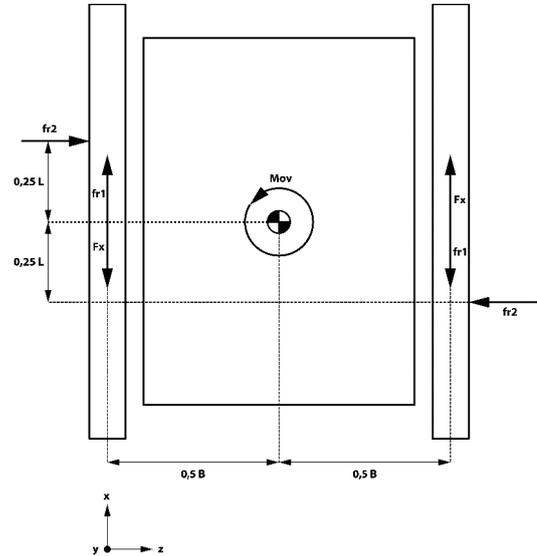


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre del robot durante la rotación.

La expresión que permite calcular la fuerza requerida por cada motor durante la rotación es la siguiente:

$$F_x = \frac{2 * J * \alpha + 2 * \mu_1 * m * g * B + \mu_2 * m * g * L}{2 * B} \quad (16)$$

Donde:

J es el momento de inercia de la plataforma ($kg * m^2$)

α es la aceleración angular ($\frac{r}{s^2}$)

μ_1 es el coeficiente de rodadura de la plataforma

μ_2 es el coeficiente de rozamiento de la plataforma

m es la masa de la plataforma (kg)

g es la aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

L es la huella de la oruga (m)

B es el ancho de la plataforma (m)

El valor que se le dé a la aceleración angular depende del comportamiento que se espere. Las constantes del entorno y del robot para esta fase son las de la Tabla 3. La fuerza requerida por cada motor de la plataforma para que esta rote es 74,44 N.

Tabla 3. Constantes del entorno y del robot utilizadas durante la rotación.

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|--|----------|-------|
| Momento de inercia (kg * m ²) | J | 2,19 |
| Aceleración angular ($\frac{r}{s^2}$) | α | 0,10 |
| Coefficiente de rodadura | μ_1 | 0,16 |
| Coefficiente de fricción | μ_2 | 0,12 |
| Masa total (kg) | m | 30,00 |
| Aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$) | g | 9,81 |
| Huella de la oruga (m) | L | 0,72 |
| Ancho de la plataforma (m) | B | 0,60 |

III. IMPLEMENTACIÓN

El robot esta constituido por dos módulos independientes: mecánico y de control.

A. Módulo mecánico

En el módulo mecánico destaca el diseño del sistema de orugas como una transmisión de banda plana. Las orugas son bandas de arrastre flexible que se acoplan a los neumáticos del sistema de ruedas reduciendo el peso, número de componentes y energía requerida para empezar a mover el sistema.

B. Módulo de control

El corazón del módulo de control es una tarjeta Arduino Mega. Con la utilización de esta tarjeta es posible controlar el robot con una amplia variedad de lenguajes de programación. El programa base con el que se presentó este proyecto fue desarrollado en Python con la ayuda del *sketch* StandardFirmata que permite una comunicación bidireccional eficiente.

IV. RESULTADOS

El propósito de este proyecto fue integrar dos sistemas de locomoción en un robot móvil para disponer, por separado, de las ventajas de cada sistema. El sistema de orugas es indispensable porque permite al robot salvar obstáculos y desplazarse sobre gradas. Para verificar la utilidad del sistema de ruedas es necesario determinar si esta configuración es más rápida y consume menos energía que la de orugas [12].

Las muestras de velocidad del robot obtenidas con ruedas y orugas se muestran en la Tabla 4. Las pruebas se realizaron sobre concreto.

Tabla 4. Muestras de velocidad del robot obtenidas con ruedas y orugas

| Velocidad con orugas (m/s) | Velocidad con ruedas (m/s) |
|----------------------------|----------------------------|
| 0,31 | 0,33 |
| 0,31 | 0,32 |

| | |
|------|------|
| 0,31 | 0,32 |
| 0,34 | 0,36 |
| 0,31 | 0,33 |
| 0,3 | 0,33 |
| 0,31 | 0,33 |
| 0,32 | 0,32 |
| 0,32 | 0,31 |

Para evaluar la diferencia entre la velocidad con ruedas y la velocidad con orugas del robot se utilizó la prueba t. El procedimiento se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Evaluación de la diferencia entre muestras de velocidad del robot con ruedas y orugas

| Parámetro | Símbolo | Ruedas | Orugas |
|------------------------|-----------|---------|---------|
| Media | \bar{y} | 0,31 | 0,33 |
| Varianza | S^2 | 0,00011 | 0,00017 |
| Desviación estándar | S | 0,0107 | 0,01315 |
| Número de muestras | n | 10 | 10 |
| Varianza común | S_p | 0,01197 | |
| Estadístico de prueba | t_0 | 3,737 | |
| Grados de libertad | ν | 18 | |
| Nivel de significación | ν | 0,05 | |
| Valor distribución t | t | 1,734 | |

Como el estadístico de prueba calculado en la Tabla 5 es mayor al valor de la distribución t puede concluirse que existe diferencia entre las velocidades desarrolladas entre las configuraciones de ruedas y orugas y la velocidad con ruedas es mayor.

Teóricamente, la velocidad del robot con ruedas es superior a la velocidad con orugas. Sin embargo, en la práctica la diferencia es imperceptible por lo que es posible afirmar que la configuración con orugas es superior a la de ruedas porque es igual de rápida y permite salvar obstáculos y gradas.

V. CONCLUSIÓN

El robot diseñado en este proyecto posee un sistema de orugas basado en una transmisión de banda plana. Este sistema, además de permitirle salvar obstáculos y gradas, logra que la configuración de orugas sea superior a la configuración de ruedas.

REFERENCIAS

- [1] Adept mobile robots, «Seekur Jr. outdoor research platform,» [En línea]. Disponible en: <http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/SeekurJr-Datasheet-RevB.sflb.ashx>. [Último acceso: 4 Noviembre 2015].
- [2] The machine lab, MMP-40 Tracked Mobile Robot Platform, The machine lab.
- [3] SuperDroid Robots, «LT2 Tracked ATR Robot Platform,» 4 Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/lt2-tracked-atr-robot-platform/1513/>.
- [4] Inspector Bots, «The MEGA Bot,» [En línea]. Disponible en: http://www.inspectorbots.com/Mega_Bot.html. [Último acceso: 4 Noviembre 2015].
- [5] Dr. Robot, «Jaguar lite user guide,» [En línea]. Disponible en: http://jaguar.drrobot.com/images/Jaguar_lite_manual.pdf. [Último acceso: 4 Noviembre 2015].
- [6] iRobot, «510 PackBot,» 4 Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.irobot.com/~media/Files/Robots/Defense/PackBot/iRobot-510-PackBot-Specs.pdf>.
- [7] Foster-Miller, «Talon robot,» 4 Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.clemson.edu/ces/crb/students/octor/product_data/talon.pdf.
- [8] J. Liu, W. Yuechao, S. Ma y B. Li, «Analisis of stair climbing ability for tracked reconfigurable modular robot,» *International workshop on safety, security and rescue robotics*, pp. 36-41, 2005.
- [9] W. Tao, Y. Ou y F. Hutian, «Research on dynamics and stability in the stairs-climbing of a tracked mobile robot,» *International Journal of advanced robotic system*, vol. 9, 2012.
- [10] H. Rastan, Mechanical design for track robot climbing stairs, Ottawa: University of Ottawa, 2011.
- [11] Y. Wong, Theory of ground vehicles, New York: Jhon Wiley & Sons, 2001.
- [12] G. Boucher y M. Sanchez, Mobile wheeled robot with step climbing capabilities, Rijeka: InTech, 2009.



Paúl Tinizaray, nació en Quito, Ecuador. Estudiante de Mecatrónica. Áreas de interés: modelamiento matemático, qeg.



Ernesto Santillán, nació en Riobamba, Ecuador. Ingeniero Mecánico. Posee estudios de postgrado en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Docente tiempo parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga.



Marco Singaña, nació en Latacunga, Ecuador. Ingeniero en Electrónica y Control. Posee estudios de postgrado en Redes Digitales Industriales. Director del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga.