

Robot Cuadrúpedo

Diseño, Construcción y Control

Bustos Torres David, Torres Félix Juan Carlos y Turrubiarres Alvarado Ignacio.

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus San Luis Potosí. Av. Eugenio Garza
Sada 300, Lomas del Tecnológico, San Luis Potosí, S.L.P. México

Resumen

Esta publicación tiene como objetivo informar los resultados de los diversos análisis realizados a un robot cuadrúpedo diseñado para participar en la competencia internacional “RoboGames”. Cada análisis está realizado bajo condiciones ideales aplicando conocimientos como mecánica de materiales, métodos numéricos, programación y electrónica.

Se logró diseñar, construir y programar un robot cuadrúpedo que compitió en “RoboGames 2011” obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras clave: Cuatro-barras, comunicación serial, tensión, mecanismo, triángulo de equilibrio, esfuerzo.

1. Introducción

“RoboGames”, originalmente conocido como “Robo-Olympics”, eran parte de un evento llamado “Makers Faire” (una feria hecha para hobbistas y estudiantes en la cual estos tienen la oportunidad de presentar proyectos relacionados con la robótica, ingeniería y ciencias). Sin embargo la cantidad de participantes y la diversidad de proyectos incrementaron tanto durante los años, que “RoboGames” se convirtió en un evento independiente de “Makers Faire”.

Cada año, esta competencia tiene lugar y en ella participantes de todo el mundo compiten en una variedad de eventos que van desde carreras de robots bípedos y combates entre robots (que pueden llegar a pesar hasta 100 kg).

La categoría en la que se enfoca el robot que se construyó fue en “Mech Warfare”, que consiste en competencias extremas entre robots equipados con cámaras y pistolas de aire controlados a distancia por medio de una computadora. Objetivos electrónicos son montados en el marco del robot.

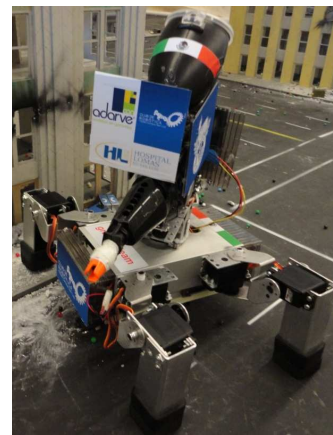


Fig.1.1 El robot cuadrúpedo “Graves” al momento de la competencia extrema.

Estos están conectados a la computadora de los jueces y es en estas en donde se registran las puntuaciones. Los participantes que controlan el robot no pueden verlo desde el exterior de la arena más que por medio de la cámara montada en el mismo, dependiendo totalmente de la visión en primera persona del robot.

Con la experiencia adquirida durante los “RoboGames 2010” con sede en San Francisco, E.U.A, el club de robótica del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus San Luis Potosí, rediseñó el cuadrúpedo para asistir a la competencia del año 2011. El robot está compuesto tanto de partes comerciales como de partes funcionales diseñadas a la medida y al mismo tiempo de fácil manufactura. Además la pistola es capaz de activar los objetivos del oponente (paneles sensibles a impactos) sin necesidad de ser excesivamente fuerte y grande. También se utilizaron servomotores de mayor torque que con anterioridad para soportar el peso del robot sin problemas.

Los “brackets” que forman la estructura de las patas fueron hechos de aluminio ya que este material era la elección evidente dadas sus

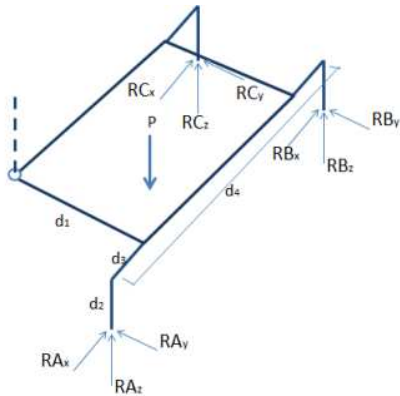


Fig. 2.1.2 Análisis parcial de la estructura principal en una posición diferente a la de inicio.

2.2 Mecánica de materiales

Cuando un metal es sujeto a una carga, es deformado sin importar cuan ligera sea la carga o que tan fuerte sea el metal. Si la carga es lo suficientemente pequeña, la deformación desaparecerá al dejar de aplicar dicha carga. Este es el caso con las cargas y los materiales que se utilizaron en el robot. Sin embargo hacer un análisis de esfuerzos de todo el marco con exactitud sin utilizar software especializado no es práctico pero se pueden asumir condiciones y dimensiones; se pueden computar las cargas por unidad de área y la fuerza aplicada por área transversal perpendicular a la fuerza. De igual forma también se pueden encontrar los esfuerzos en los tornillos aplicando las fórmulas de esfuerzo axial y cortante utilizando los datos encontrados en el análisis de estático:

$$\sigma = P/A \quad (1)$$

$$\tau = F/A \quad (2)$$

Donde: F= fuerza , A= área, P= presión

Para los esfuerzos a los que está sujeto el perfil comercial hueco (tórax), en cada esquina se representa una fuerza "F" con una fuerza "-F" opuesta. Los esfuerzos pueden ser deducidos por medio de las siguientes expresiones:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (3)$$

$$dF = \sigma \times dA \quad (4)$$

$$\int dF = \int \sigma \times dA \quad (5)$$

Simbolizando la magnitud resultante de las fuerzas internas se obtiene:

$$P = \int^A dF = \int_A \sigma \times dA \quad (6)$$

Para analizar el esfuerzo cortante en cualquier punto del tórax hueco, es necesario utilizar el torque "T" de magnitud dependiente de la rutina que se esté analizando en dicho momento. El torque máximo es generalmente alcanzado en el empuje de del cuerpo hacia adelante por una de las patas delanteras. Sin embargo en esta versión del cuadrúpedo el torque en estas condiciones es considerablemente menor que en el primer modelo. La ecuación utilizada para las aproximaciones se muestra a continuación:

$$\tau = \frac{T}{2t\mathcal{C}} \quad (7)$$

Donde t es el espesor de la pared en el punto de interés y \mathcal{C} es el área rodeada por la línea central.

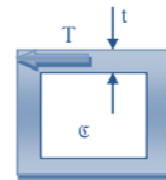


Fig. 2.2.1 Fuerzas que actúan en el perfil hueco.

El servomotor también está sujeto a torsión por el simple hecho de transmitir potencia de un punto a otro. Haciendo un corte en cualquier parte de la flecha expuesta al exterior del servomotor se encontrarían las siguientes fuerzas:

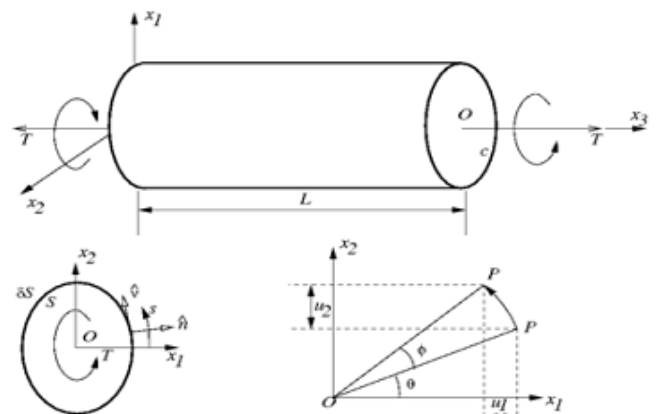


Fig 2.2.2 Diagrama de fuerzas que actúan sobre una la flecha.

Donde "T" es la torsión y Φ es el ángulo. Los distintos esfuerzos son encontrados con las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{p}{c} \tau_{max} \quad (8)$$

Donde p es la distancia desde el origen a un punto en el eje y c es el radio.

Torsión:

$$T = \frac{\tau_{max}}{c} J \quad (9)$$

Momento de Inercia:

$$J = \frac{\pi}{2} C^4 \quad (10)$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \tau_{max} \quad (11)$$

Ángulo de calado:

$$\phi = \frac{TL}{JG} \quad (12)$$

Donde G es el módulo de cortante

Potencia:

$$P = 2\pi T f \quad (13)$$

Donde f es la frecuencia de rotación

2.3 Análisis del mecanismo

Ya que el cuadrúpedo es controlado por señales eléctricas, no existen mecanismos en el cuerpo mismo. Para agregar valor se analizó la pistola de aire montada en la parte superior del robot. El análisis consiste en establecer ecuaciones de posición, velocidad y aceleración el mecanismo de 4 barras que dispara la pequeña bala. De esta forma se puede determinar la aceleración del proyectil y saber si este activará o no los objetivos electrónicos de los oponentes.

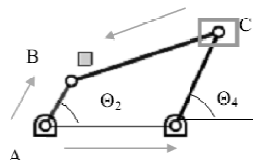


Fig. 2.3.1 Diagrama del mecanismo de 4 barras. C es el pistón que dispara el proyectil y se encuentra en su posición inicial.

2.3.1 Análisis de posición

$$ABe^{i\theta_2} - CBe^{i\theta_3} - DCe^{i\theta_4} - ADe^{i0^\circ} = 0 \quad (14)$$

En la ecuación previa existen tres variables por resolver (CB, θ_3 , θ_4); por lo tanto hay 3 incógnitas. Para obtener otra ecuación, una relación entre los ángulos θ_3 y θ_4 es establecida, generando la siguiente ecuación:

$$\theta_3 = \theta_4 \pm \gamma \quad (15)$$

Donde γ es el ángulo fijo y ambos signos se mantienen para obtener una configuración abierta. La ecuación de Euler para el análisis de posición de un mecanismo cuatro-barras es:

$$ABe^{i\theta_2} - CBe^{i\theta_3} - DCe^{i\theta_4} - AD = 0 \quad (16)$$

De la parte real e imaginaria de la ecuación los siguientes valores son obtenidos:

$$AB \cos\theta_2 - \frac{AB \sin\theta_2 - DC \sin\theta_4}{\sin\theta_3} \cos\theta_3 - DC \cos\theta_4 - AD = 0$$

Sustituyendo en (15) y reduciendo términos, se obtiene:

$$S \sin\theta_4 + T \cos\theta_4 + U = 0 \quad (17)$$

Donde:

$$\begin{aligned} S &= AB \sin\theta_2 \sin\gamma + (AB \cos\theta_2 - AD) \cos\gamma \\ T &= -AB \sin\theta_2 \cos\gamma + (AB \cos\theta_2 - AD) \sin\gamma \\ U &= -DC \sin\gamma \end{aligned}$$

Resolviendo para θ_4 y por medio de una identidad semi-angular, se obtiene la siguiente ecuación:

$$S \frac{2 \tan\left(\frac{\theta_4}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{\theta_4}{2}\right)} + T \frac{1 - \tan^2\left(\frac{\theta_4}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{\theta_4}{2}\right)} + U = 0 \quad (18)$$

Simplificando y resolviendo se determina que θ_4 es:

$$V \tan^2\left(\frac{\theta_4}{2}\right) - W \tan\left(\frac{\theta_4}{2}\right) - X = 0 \quad (19)$$

$$\theta_4 = 2 \arctan\left(\frac{-W \pm \sqrt{W^2 - 4UX}}{2V}\right) \quad (20)$$

2.3.2 Análisis de Velocidad

Al derivar la ecuación de Euler (14), se obtienen:

$$ABe^{i\theta_2} - CBe^{i\theta_3} - DCe^{i\theta_4} - ADe^{i0} = 0 \quad (21)$$

$$iW_2ABe^{i\theta_2} - (iW_3 CBe^{i\theta_3} + V_{CB}e^{i\theta_3}) - iW_4DCe^{i\theta_4} = 0 \quad (22)$$

Desarrollando la ecuación anterior y agrupando términos similares, se obtiene la velocidad a la que se mueve el punto C (Fig. 3.3.1):

$$V_{CB}\cos\theta_3 = \omega_4(CB\sin\theta_3 + DC\sin\theta_4) - \omega_2AB\sin\theta_2 \quad (23)$$

$$V_{CB}\sin\theta_3 = \omega_2AB\sin\theta_2 - \omega_4(CB\cos\theta_3 + DC\cos\theta_4) \quad (24)$$

$$V_{CB} = \frac{\omega_4(CB\sin\theta_3 + DC\sin\theta_4) - \omega_2AB\sin\theta_2}{\cos\theta_3} \quad (25)$$

Resolviendo para ω_4 :

$$\omega_4 = \frac{AB\omega_2\cos(\theta_2 - \theta_3)}{BC + \cos(\theta_4 - \theta_3)} \quad (26)$$

2.3.3 Análisis de aceleración

Se comienza por resolver la identidad de Euler. Para obtener la aceleración lineal (también conocida como “doble punto” por algunos autores) una variable E es sustraída de la identidad de Euler en el componente real:

$$AB\alpha_2\cos\theta_2 - AB\omega_2^2\sin\theta_2 + BC\alpha_3\cos\theta_3 + BC\omega_3^2\cos\theta_3 - E = 0 \quad (27)$$

$$\alpha_3 = \frac{AB(\alpha_2\cos\theta_2) - (AB\omega_2^2\sin\theta_2 + BC(\omega_3^2\sin\theta_3))}{BC\cos\theta_3}$$

La aceleración lineal resultante es:

$$E = -AB\alpha_2\sin\theta_2 - AB\omega_2^2\cos\theta_2 + BC\alpha_3\sin\theta_3 + BC\omega_3^2\cos\theta_3 \quad (28)$$

3. Diseño

Después de obtener las formulas y expresiones, cargas, dimensiones y otras propiedades físicas se comenzaron a realizar los análisis de esfuerzos por el método de Elemento Finito. Se tomaron en cuenta varias configuraciones y medidas para estos análisis.

El software utilizado para este propósito fue el paquete de CAD/CAE/CAM Siemens UGS NX 7.5;

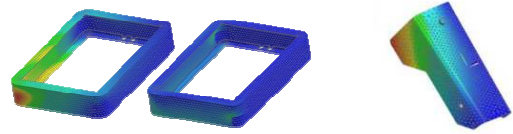


Fig. 3.1 Resultados individuales de los análisis de esfuerzos en las partes del marco bajo distintas condiciones.

en él se diseñaron las piezas, se hicieron los ensamblajes y se determinaron los esfuerzos a lo largo del cuerpo del cuadrúpedo.

En relación al cuadrúpedo del año anterior, la segunda versión tiene una altura menor, con una longitud menor de las extremidades (al no ser brackets comerciales se pudieron utilizar otros menores que permiten tener espacios más estrechos entre partes del ensamblaje). Se agregaron tornillos extra en relación a los brackets comerciales para montaje de los servomotores en puntos poco probables y agregar puntos de apoyo para reducir la fatiga. Se logró no solamente reducir los esfuerzos y la fatiga de materiales (haciendo un cuerpo mucho más robusto y confiable) para incrementar la estabilidad general del marco. El cuerpo del robot fue alterado en relación a las especificaciones originalmente planeadas para facilitar la instalación de los componentes electrónicos y reducir costos de fabricación.

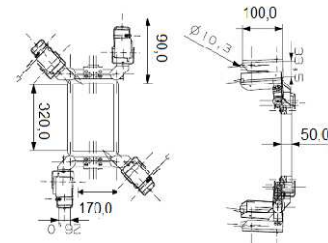


Fig. 3.2 Marco del robot sin electrónicos montados. Etapa temprana basada en las primeras pruebas realizadas

4. Control

La lógica de programación fue desarrollada empleando el paquete de software matemático MATLAB. Este es un lenguaje de programación de alto rendimiento para computación técnica. El código generado se basa en el principio del “triángulo de equilibrio”; la idea central del concepto es generar un arreglo triangular permanente de puntos de contacto en el suelo (tres

patas siempre están en contacto con el suelo). De tal forma, la mayor parte del peso del robot siempre estará en el centroide de dicho triángulo, asegurando la estabilidad permanente del robot (si el hardware es capaz de sobrellevar la carga).

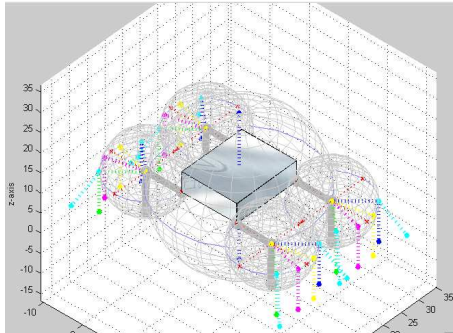


Fig. 4.1 Gráfica generada en MATLAB que muestra las zonas de estabilidad para cada pata en cada rutina de movimiento.

El programa generado en MATLAB simula el caminado del robot y especifica los ángulos que los servomotores deben adoptar para el caminado. El programa es además capaz de controlar al robot por medio de comunicación inalámbrica Xbee (protocolo similar a Wi-fi de bajo consumo de energía y de bajo anchos de banda) utilizando un medio de entrada (un joystick en este caso). Es capaz de graficar (y animar) en tres dimensiones los movimientos de las patas de forma precisa (Fig. 5.1); basta con ingresar las medidas del cuerpo del robot y este generará el código que asegura la mayor estabilidad posible de acuerdo al principio de triángulos de equilibrio.

5. Análisis de resultados y conclusiones

De acuerdo a los resultados de las pruebas de esfuerzo y de programación se determinaron ciertas características que mejorarían el funcionamiento, especialmente en cuestión a las patas. Las pruebas de los componentes electrónicos no registraron problemas. Asimismo la integración de componentes electrónicos con mecánicos fue infalible y robusta. Durante la competencia se obtuvo un 5to lugar de entre 32 competidores de todo el mundo. Limitantes como una red LAN saturada con ruido fue el problema más común, así como otros pequeños detalles que no afectaron de forma considerable el rendimiento del robot. Uno de los puntos a mejorar es la integración de distintos paquetes de software en lugar de interdependencia

de módulos aislados de software

La robótica es un área fascinante que engloba una serie de ramas ingenieriles y este proyecto es un excelente ejemplo de esa diversidad. Al combinar los conocimientos adquiridos durante lo largo de la carrera de Ingeniería Mecatrónica para aplicaciones que no fueron concebidas dentro del plan de estudios se refuerza esta noción. Asimismo las habilidades y disposición para adquirir nuevo conocimiento por cuenta propia son de vital importancia. El club de robótica se encuentra actualmente trabajando en una tercera versión de robot cuadrúpedo considerando restricciones de presupuesto menos limitadas, presentaciones de nivel nacional e internacional y en la organización de una competencia nacional de robótica (ROBOTEC 2011).

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. S. Rolando Cruz Ramírez su persistente apoyo y asesoría desde los comienzos del club de robótica a la fecha, tanto en viajes relacionados como en aspectos técnicos.

7. Referencias

- [1] Hibbeler, R. C.. *Mecánica de materiales. 6a ed.* México: Pearson Educación, 2006.
- [2] Hibbeler, R. C., Jesús Elmer Murrieta, and Felipe de Jesús Cavazos. *Ingeniería mecánica: estática.* 12a ed. Naucalpan de Juárez, Edo. de México.: Pearson Educación de México, 2010.
- [3] Norton, Robert L., and Jesús Elmer Murrieta. *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos.* 4a ed. México: McGraw-Hill, 2009.
- [4] Pratap, Rudra. *Getting started with MATLAB 7 a quick introduction for scientists and engineers.* 1a ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- [5] D J Higham, Nicholas J Higham. *MATLAB guide.* 2a ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.
- [6] "SparkFun Electronics - News." SparkFun Electronics - News. Web. 20 Oct. 2010. <http://www.sparkfun.com/commerce/categories.php>>