



Diseño Mecatrónico de un Robot Móvil

García Silla Daniel¹, Vargas Soto José Emilio², Díaz Delgado Guillermo²
y González Gutiérrez Arturo²

Universidad Autónoma de Querétaro, ¹Facultad de Informática, ²Facultad de Ingeniería.

Resumen

El desarrollo de un robot móvil requiere la integración de varias disciplinas, entre las que destacan la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica y los sistemas computacionales. Es por ello que se considera un robot móvil como un tipo de máquina mecatrónica. En este trabajo se abordan los diferentes elementos que se utilizaron en el diseño mecánico de un robot móvil en sus diferentes etapas de desarrollo. De acuerdo a la maduración lograda en el proyecto se realizaron diferentes versiones del robot móvil, las cuales se describen brevemente como parte de un trabajo que permitió lograr una experiencia asociada al desarrollo de este tipo de máquinas.

Palabras clave: Robot omnidireccional, modelación, sistema mecatrónico.

3. Introducción

En los últimos años los robots móviles se han posicionado en diferentes campos de aplicación, una de las finalidades de este tipo de máquinas es ayudar en actividades cotidianas; sobre todo en aquellas tareas que requieren algún tipo de asistencia remota. Esta es una de las razones por la cual se han generado grupos de investigadores que actualmente desarrollan proyectos en donde se crean vehículos robóticos capaces de desplazarse de forma omnidireccional [1-5]. En este sentido, resulta particularmente conveniente lograr una movilidad que permita una amplia variedad de posiciones, lo que posibilita la aplicación de robots móviles en diversas tareas; por ejemplo, en el desarrollo de una silla de ruedas para personas alguna discapacidad de locomoción, en la mayoría de las ocasiones las investigaciones se centran en optimizar y aprovechar los espacios de áreas de trabajo. Sin embargo en la práctica los movimientos pueden ser incómodos o imposibles de realizar con las sillas de ruedas convencionales. Es por esto que se han llegado a realizar algunas sillas de ruedas capaces de realizar movimientos omnidireccionales, permitiendo al usuario una serie de movimientos que antes no creían posibles. En el ámbito industrial basándose en la misma idea de espacios reducidos, podría desarrollarse un montacargas de forma que se utilice un mínimo de espacio para realizar las tareas de maniobra sin problemas. [6-9].

Un robot omnidireccional es un tipo de robot móvil con una configuración que le permite realizar un movimiento libre en cualquier dirección con la posibilidad de alcanzar cualquier punto a pesar de ser una estructura compleja. Mientras los robots móviles comunes se componen de un arreglo de ruedas convencionales, las cuales pueden ser articuladas para establecer un radio de giro, la forma de un robot omnidireccional puede variar usando diferentes tipos de ruedas. Por otra parte, también existen las ruedas omnidireccionales, este tipo de ruedas tienen una serie de rodillos que permiten no solo un movimiento del robot en el sentido del giro de la rueda, sino además es posible lograr un movimiento perpendicular del robot con respecto al sentido normal de giro de sus ruedas.



Las aplicaciones de robots móviles son muy amplias, algunas de éstas comprenden el uso de robots móviles para entretenimiento de carritos móviles con distintos desempeños, robots exploradores utilizados en arqueología, robots que transportan material peligroso en áreas específicas de algún proceso, entre otras aplicaciones. Una de las soluciones de robótica que permite el diseño de los distintos robots móviles es una estructura modular adecuada y bien adaptada a las condiciones locales que presenta cada aplicación, tomando en cuenta las áreas de alto riesgo en donde se pueda mejorar en la seguridad del personal, así como la eficiencia en el trabajo, la productividad y flexibilidad. En este sentido, los sistemas móviles equipados con manipuladores para detección y localización de minas terrestres son considerados una herramienta muy necesaria en la localización de minas de forma autónoma o semiautónoma, lo que ha permitido desactivar explosivos con ayuda de sistemas robóticos de forma competente, segura y eficaz.

Sin importar el tipo de robot, es importante el desarrollo de la parte formal del robot la cual corresponde al modelado del comportamiento cinemático, el modelado dinámico, el desarrollo del control que implica el diseño y escritura de software [3,4,5]. Esto motiva la investigación y desarrollo, dando como resultado un considerable número de documentos sobre el tema

Una característica especial de un robot omnidireccional es la propiedad de movilidad en cualquier dirección deseada, que nos dice que “la rueda es orientable respecto al robot por medio de una rotación en el eje vertical sobre el plano de la rueda que no pasa por el centro de la rueda”, en pocas palabras se podría decir, que podemos orientar nuestra rueda en cualquier dirección deseada del robot.

En general, se puede analizar el movimiento de los robots móviles a partir de la ubicación de su centro de rotación instantáneo (ICR), como se muestra en la Figura 1. El ICR es un punto en el cual el centro de todos los ejes coincide en un instante dado. Es un punto que permite lograr una referencia para conocer el radio de giro que tiene un robot móvil cuando se les da una dirección específica a las ruedas. Este es parámetro importante en el estudio de un robot omnidireccional porque mientras otros tipos de robots requieren hacer una rotación para cambiar su dirección un robot omnidireccional puede realizar estos movimientos, solo cambiando el sentido de giro de sus ruedas o reacomodando su estructura para avanzar en otra dirección.

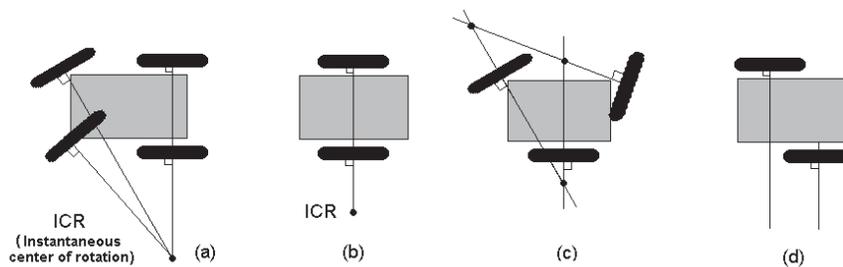


Figura 1. Configuraciones del robot móvil.

Gracias a ésta característica, el espacio de trabajo de un robot omnidireccional es más amplio con respecto a otro tipo de robot móvil, esto debido a que su desplazamiento no se encuentra limitado por el espacio y las maniobras requeridas para lograr una posición deseada, es por ello que un robot omnidireccional se considera una solución ideal para trabajar en zonas de espacios reducidos.

Por otro lado, existen dos aspectos de especial interés en el estudio de los robots móviles, su grado de movilidad y su grado de direccionabilidad; el primero puede ser definido como la libertad que tiene un robot en movimiento, mientras que el grado de direccionabilidad, se refiere a las ruedas direccionables del robot que permiten dirigir al robot, de acuerdo como se muestra en la Figura 2.

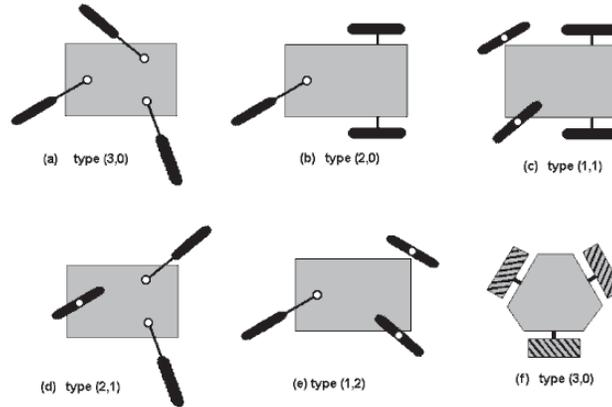


Figura 2. Algunas configuraciones de un robot omnidireccional.

Algunas de las relaciones más comunes entre el grado de movilidad y la direccionalidad del robot se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Algunas combinaciones posibles entre grado de movilidad y de direccionalidad

Grado de movilidad	3	2	2	1	1
Grado de direccionalidad	0	0	1	1	2

En general, un sistema robótico está integrado por diversos elementos, entre los que destacan:

- La mecánica que incluye el modelo y diseño del robot, así como sus componentes.
- La electrónica conformada por un sistema procesador y las etapas de potencia.
- El control que integra la electrónica con los actuadores y los sensores.

En el presente trabajo nos ocuparemos de la parte mecánica, el diseño y sus modelos matemáticos.

4. Robot Móvil

En la construcción y diseño de un robot móvil, al igual que de cualquier máquina, se debe llevar a cabo un análisis de los requerimientos o especificaciones técnicas de acuerdo a sus funciones, movilidad y aplicación. Tomando en cuenta estos aspectos, se pasa a la etapa del diseño de un modelo que ponga en perspectiva que es lo que se desea desarrollar. En este caso, el diseño de nuestro robot se basa en la movilidad en espacios pequeños con la opción de que sea reconfigurable para adaptarse al medio en el que se desarrolla, otras consideraciones como la selección del motor adecuado se podrá deducir a partir de la dinámica del robot, esto para definir el torque que requiere el motor a fin de poder lograr el movimiento de forma correcta.

Existen diversas herramientas computacionales para realizar el diseño del robot, en este proyecto se utilizó el programa: Solidworks, software de diseño CAD en 3D. Algunos de los posibles problemas considerados en el diseño fue la cantidad de peso que podría soportar cada elemento del robot, esto podría provocar que nuestras piezas se deformen más de lo deseado. Para evitar estas situaciones se utilizaron módulos de Solidworks que permiten el análisis de las piezas para evitar o prevenir estos acontecimientos y saber la distribución de esfuerzos y deformaciones en



componentes que se consideren críticos, de acuerdo como se aprecia en la Figura 3. Por otro lado, la herramienta computacional nos permitió desarrollar los planos de fabricación de las piezas del robot, los cuales son necesarios al momento de la fabricación y ensamble de la estructura mecánica del robot.

En la Figura 3 se muestra una imagen utilizada en el análisis de los niveles de esfuerzos en uno de los eslabones de la estructura del robot, se puede apreciar los niveles de esfuerzos a fin de valorar una deformación mínima con el propósito de evitar una fractura en dicha pieza.



Figura 3. Desplazamiento en deformación con carga de 20 N.

Así como este caso presentado en el análisis de deformación de un eslabón, se efectuaron análisis en otras piezas del robot, las cuales no se presentan por falta de espacio. Dependiendo de la carga aplicada puede o no haber efectos en la pieza analizada, también se puede observar cuanto se deforma en cuestión de desplazamiento en milímetros y si excederá el límite elástico, punto que al sobrepasarlo se puede considerar que el material quedara permanentemente deformado.

En la Figura 4 se muestra el diseño 3D del robot, a partir de este modelo tridimensional se efectuó la construcción mecánica del mismo, usando como material base aluminio, esto por su bajo peso y costo. El modelo realizado fue un primer prototipo, el cual fue extremadamente útil para analizar posibles fallas y complicaciones que se podrían presentar en la construcción.

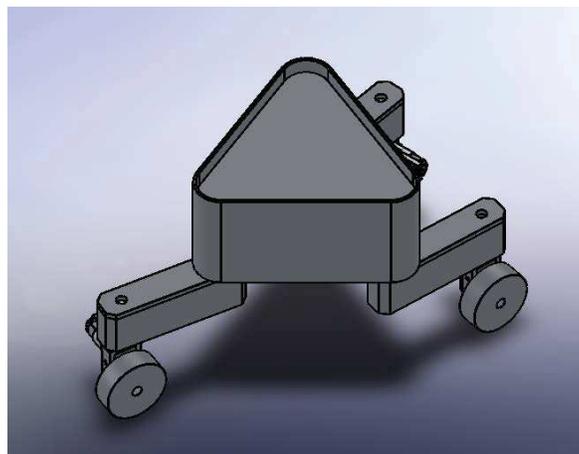


Figura 4. Diseño de un Robot en Solidworks.



5. Aspectos cinemáticos

Uno de los aspectos más importantes que permiten conocer y comprender el movimiento del robot móvil es la generación de los modelos matemáticos a partir de las ecuaciones diferenciales que resultan de los principios físicos asociados al movimiento de cuerpos rígidos, los vectores de posición y los ángulos a los cuales se encuentran los eslabones del robot, para demostrar en cualquier instante la posición $\{C\}$, la velocidad lineal con la que se mueve $\{V_c\}$ y la aceleración del robot en todo momento. En la figura 5 se muestran los parámetros del modelo cinemático en la estructura del robot a seguir a partir de [10], a fin de obtener vectores que definen la cinemática del robot.

Cabe resaltar que en el modelo desarrollado no se considera el deslizamiento entre la rueda y el terreno por donde se desplaza el robot, lo cual permite simplificar el modelo. Algunas de las restricciones en las que se basa el modelo matemático son:

- El robot se mueve sobre una superficie plana.
- No existen elementos flexibles en la estructura del robot (incluidas las ruedas).
- Las ruedas poseen uno o ningún eje de direccionamiento, de manera que este último siempre es perpendicular al suelo.
- No se consideran ningún tipo de fricciones en elementos móviles del vehículo, o contra el suelo.

De acuerdo a la Figura 5, se definieron los siguientes parámetros:

$\{C\}$: Este valor marca el centro de robot, podría utilizarse el centro de gravedad, como punto de guía del vehículo. Donde sus coordenadas serán (x_c, y_c) y su ángulo de orientación θ_c respecto al sistema general o global $\{M\}$.

$\{F_i\}$: Sistema marcado en la unión i -ésima del brazo con el cuerpo del robot. Con un ángulo α_i para representar la orientación relativa respecto a $\{C\}$ y su vector de posición es λ_i . Esto se realiza para denotar la ubicación de cada eslabón.

$\{D_i\}$: Este sistema se encuentra de igual manera en la unión del eslabón i -ésimo y el cuerpo del robot su finalidad es el estudio del cambio del ángulo de dirección, entre el sistema actual y el anterior, β_i , este sistema no tiene vector de posición ya que se encuentra en el mismo punto que $\{F_i\}$.

$\{R_i\}$: Este sistema como se puede ver se encuentra en la unión entre el eslabón i -ésimo y la unión de la rueda i -ésima, su ángulo de dirección respecto a $\{D_i\}$ y su vector de posición son respectivamente γ_i y δ_i .

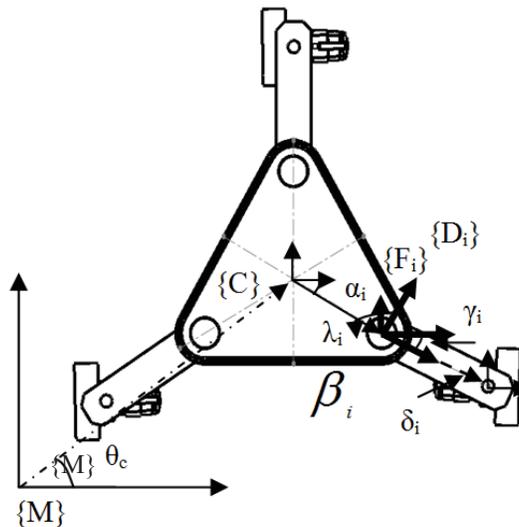


Figura 5. Parámetros del modelo cinemático de robot móvil.



Como se menciono anteriormente, existe un punto de interés en el estudio de robots móviles, el centro de gravedad. Dicho este punto es importante, no solo en la creación de robots si no en la creación de cualquier vehículo, ya que este brinda información sobre estabilidad al robot. En la Figura 6 se muestra el centro de gravedad del robot realizado, mientras más bajo sea o cercano al suelo mayor estabilidad tendrá al robot, si este punto se encontrara en un punto lejano al suelo es más probable que a una alta velocidad o a una fuerza pequeña aplicada contra el robot este se pueda voltear.

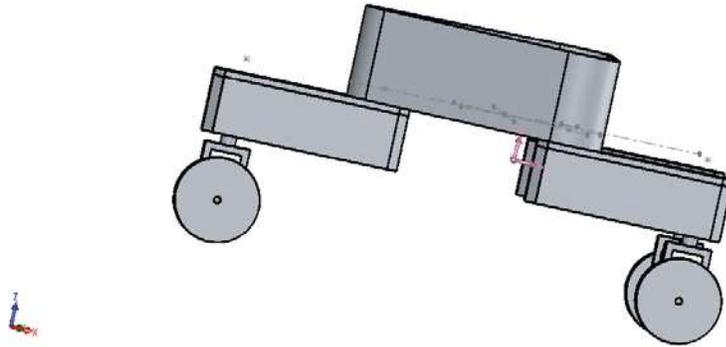


Figura 6. Centro de gravedad de robot móvil.

6. Aspectos dinámicos

Así como se describió la importancia del modelo cinemático, de igual manera se pueden establecer para cada instante las ecuaciones que consideren el efecto de las masas inerciales de los componentes, así como la fricción y los pares de cada motor en cada rueda. El principal objetivo de un estudio dinámico en robots móviles es establecer los torques para mover cada rueda del robot, esto es de suma importancia ya que nos permite determinar la energía necesaria que requiere cada motor para mover adecuadamente al robot móvil. Así mismo, la dinámica nos permite valorar velocidades, aceleraciones, así como efectos inerciales. En la sección anterior se mencionó que en el modelo cinemático no se considera el efecto de deslizamiento, esto es posible si existe una relación adecuada entre el peso del robot y potencia de los motores.

Algunas consideraciones mecánicas que se deben tener en cuenta para un buen diseño de un robot móvil son las siguientes:

- Ubicación del centro de gravedad.
- Masas inerciales de los elementos mecánicos.
- Potencia de los motores.
- Relación de las velocidades.

Todo esto con la finalidad de evitar cualquier posibilidad de tener deslizamiento entre la rueda y el terreno. El deslizamiento se puede considerar a partir del contacto de la rueda con el terreno, en ese momento se presentan diversas fuerzas, una es éstas fuerzas es la fuerza con la que se mueve el robot, otra es la fuerza que se opone al movimiento; es decir, la fuerza de fricción, la cual está compuesta por una fuerza normal al peso del robot y un factor de rugosidad entre el material de la rueda y el material del terreno, de acuerdo como se muestra en la Figura 7.

Mientras exista una adecuada relación entre el peso del robot y la fuerza de fricción, no habrá deslizamiento, pero si se aplicara una aceleración elevada para mover al robot, lo que podría pasar es que la relación peso-fricción cambia a tal grado que la rueda se patinaría sobre el terreno y no se generaría movimiento alguno.

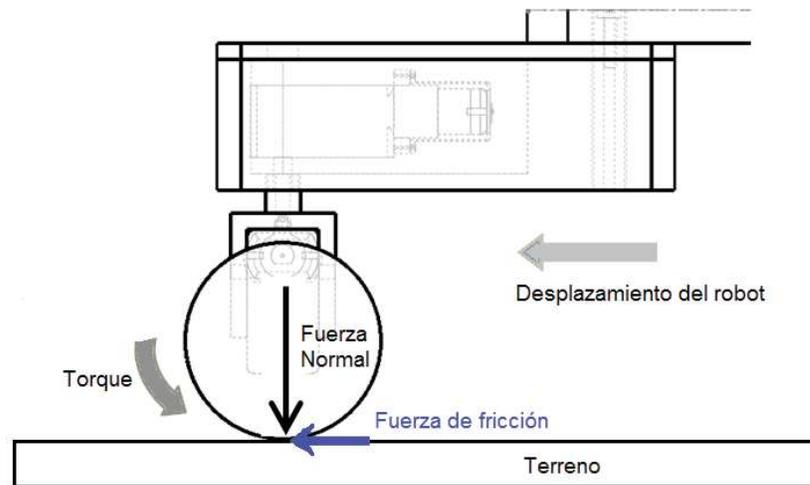


Figura 7. Análisis de las fuerzas en la rueda del robot.

7. Resultados

Derivado del planteamiento presentado en las secciones anteriores, durante varios meses se efectuaron tareas inherentes a la construcción, ensamble, control y pruebas del robot móvil omnidireccional descrito en el presente trabajo. Logrando con ello una experiencia en el conocimiento de éste tipo de máquinas, lo que nos permitió mejorar el diseño original. La Figura 8 muestra el primer prototipo de robot omnidireccional realizado como parte de un proyecto de investigación.



Figura 8. Robot fabricado en aluminio (primera versión).

El análisis del primer prototipo nos permitió mejorar el diseño del robot, principalmente en lo que se refiere a su centro de gravedad, la longitud de los eslabones, la relación peso-fricción y las velocidades de desplazamiento. Dicho análisis está fuera del alcance del presente documento por



falta de espacio. Sin embargo, es importante mencionar que como resultado del trabajo derivado en el primer prototipo se diseñó y construyó una segunda versión, la cual presenta una mayor estabilidad al bajar la plataforma central del robot, en el cual se articulan los eslabones que sostienen las ruedas, de acuerdo como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Robot omnidireccional en su segunda versión.

De igual forma, esta segunda versión nos permitió comprender mejor aspectos asociados a la generación de algoritmos que dotaran de cierta autonomía el desplazamiento que debería de realizar el robot al ir de un lugar a otro. Se reconocieron aspectos de diseño asociados a la integración de la información proveniente de sensores, los cuales nos llevaron a efectuar nuevamente cambios de la ubicación de la plataforma del robot, de acuerdo como se muestra en la Figura 10.



Figura 1. Construcción de robot en su versión final.

8. Conclusiones

En este trabajo se muestran algunos aspectos del diseño de un robot móvil omnidireccional. Se describen los principales criterios de diseño que se tomaron en cuenta, así como aspectos asociados a la cinemática y dinámica de un robot omnidireccional. Con relación los aspecto cinemáticos del robot la modelación planteada nos permitió valorar desde un punto de vista teórico el efecto que presenta la ubicación del centro de gravedad del robot para garantizar su estabilidad,



Con relación al modelo dinámico es relevante mencionar la importancia que presenta la relación peso-fricción, a fin de garantizar un uso eficiente de la energía utilizada para mover al robot. Otro aspecto en el cual se debe tener especial atención cuando el vehículo es de tres apoyos, como es el caso de los robots realizados, es de verificar la altura del centro de masa para evitar volcaduras, pero al mismo tiempo asegurando que sensores capaces de detectar obstáculos puedan ser utilizados de forma adecuadamente en este tipo de robots. Se logró una experiencia en el diseño, construcción y control de éste tipo de máquinas que anteriormente no se tenía.

Referencias

- [1] S.L. Dickerson and B.D. Lapin, 1991, "Control of an Omni-Directional Robotic Vehicle with Mecanum Wheels", National Telesystems Conference Proceeding.1: 323-328.
- [2] M.-J. Jung, H.-S. Kim, S. Kim, and J.-H. Kim, 2000, "Omni-Directional Mobile Base OK-II", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4: 3449-3454.
- [3] Y. Mori, E. Nakano, T. Takahashi, and K. Takayama, 1999, "Mechanism and Running Modes of New Omni-Directional Vehicle ODV9", JSME International Journal, Series C, 42(1): 210-217.
- [4] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S. Tzafestas, J. Tang, and T. Fukuda, 1998, "Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 22: 315-330.
- [5] G. Witus, 2000, "Mobility Potential of a Robotic 6-Wheeled Omni-Directional Drive Vehicle (ODV) with Z-Axis and Tire Inflation Control", Proceedings of SPIE, 4024: 106-114.
- [6] M. Asada, H. Kitano (Eds.), RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II, Lecture Notes in Computer Science, Springer, New York, 1999.
- [7] R. D'Andrea, T. Kalmár-Nagy, P. Ganguly, M. Babish, The Cornell RoboCup Team, in: G. Kraetzschmar, P. Stone, T. Balch (Eds.), Robot Soccer World Cup IV, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2019, Springer, Berlin, 2001, pp. 41-51.
- [8] H. Kitano, J. Siekmann, J.G. Garbonell (Eds.), RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I, Vol. 139, Lecture Notes in Computer Science #1395, Springer, New York, 1998.
- [9] M. Veloso, E. Pagello, H. Kitano (Eds.), RoboCup-99: Robot Soccer World Cup III, Lecture Notes in Computer Science, #1856 Springer, New York, 2000.
- [10] V. F. Muñoz Martínez, G. Gil-Gómez y A. García Cerezo, "Modelado cinemático y dinámico de un robot móvil omni-direccional", XXIV Jornadas de Automática, León, 10-12 de septiembre de 2003, España.
- [11] Jae Heon Chung, Byung-Ju Yi, Whee Kuk Kim "The dynamic modeling and analysis for an Omni-directional mobile robot with three caster wheels"
- [12] Yong Liu, Xiaofei Wu, J Jim Zhu and Jae Lew, "Omni-Directional Mobile Robot Controller Design by Trajectory Linearization"
- [13] Robert L. Williams II, Brian E. Carter, Paolo Gallina and Giulio Rosati "Dynamic Model with Slip for Wheeled Omni-Directional Robots"
- [13] Brian Carter, Matt Good, Mike Dorohoff, Jae Lew, Robert L. Williams II, Paolo Gallina "Mechanical Design and Modeling of an Omni-directional RoboCup Player"
- [14] John Lovine PIC Robotics, McGraw-Hill
- [15] Jae-Bok Song, Kyung-Seok Byun "Design and Control of an Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels"
- [16] Raul Rojas and Alexander Gloye Forster, "Holonomic Control of a robot with an omnidirectional drive".
- [17] Tae Bum Park, Jae Hoon Lee , Byung-Ju Yi, Whee Kuk Kim, Bum Jae You, Sang-Rok Oh, "Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omnidirectional Mobile Robots"
- [18] Luis Adrian Zuñiga Aviles, Jesus Carlos Pedraza Ortega, Efren Gorrostieta Hurtado(2012) . Experimental Study of the Methodology for the Modelling and Simulation of Mobile Manipulators. Int J Adv Robot Syst, 2012, 9:192. doi: 10.5772/51867.