

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO Y TELE-OPERADO

DESIGN AND PROTOTYPING OF AN AUTONOMOUS AND TELE- OPERATED MOBILE ROBOT

Ramiro Velázquez Guerrero

Universidad Panamericana, México
rvlazquez@up.edu.mx

María Teresa Orvañanos Guerrero

Universidad Panamericana, México
torvananos@up.edu.mx

Ricardo Macías Quijas

Universidad Panamericana, México
rmacias@up.edu.mx

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

En este artículo se presenta el diseño, modelado y prototipado de un robot móvil con aplicaciones potenciales en exploración de zonas accidentadas o de difícil acceso, reconocimiento, seguridad, defensa, rescate, entre otras. El sistema mecánico está basado en la configuración diferencial de robots móviles. El prototipo utiliza dos motores eléctricos de alta potencia que le permiten sortear obstáculos y navegar en terrenos difíciles con buena precisión y a una velocidad máxima de 20 km/h. El sistema de control está basado en un sistema embebido y dos sensores principales: una cámara RGB y un arreglo de sensores ultrasónicos que habilitan la navegación autónoma. Adicionalmente el robot propuesto puede ser tele-operado utilizando un casco de realidad virtual y un dispositivo háptico kinestésico mientras que la transmisión de video y el intercambio de datos se realizan por un módulo de comunicación de radiofrecuencia (RF).

Palabras Clave: Navegación autónoma, robot móvil, sensado ultrasónico, tele-operación, vehículo diferencial, visión por computadora.

Abstract

This paper presents the design, modeling, and prototyping of a mobile robot with potential applications in the fields of exploration, reconnaissance, security, defense, rescue, among others. The mechanical system is based on the differential drive structure driven by two high-power electrical motors that allow the prototype to negotiate obstacles and navigate rough terrain with a high degree of accuracy at a maximum speed of 20 km/h. The control system is based on an embedded micro-controller architecture and two main sensors: a color camera and an array of ultrasonic sensors, which enable autonomous navigation of the robot. In addition, the robot can also be tele-operated using a virtual reality helmet and a kinesthetic haptic device while video and data exchange are provided by a RF communication link.

Keywords: *Autonomous navigation, differential vehicle, machine vision, mobile robot, tele-operation, ultrasonic sensing.*

1. Introducción

La tecnología empleada en robots y sistemas inteligentes tal como los sensores, unidades de procesamiento, microelectrónica, técnicas avanzadas de manufactura y software especializado han madurado al punto en el cual es posible desarrollar robots móviles inteligentes altamente funcionales para uso en el hogar, la industria y espacios públicos con el fin de asistir al hombre en sus labores, en su educación o en su entretenimiento. Los sistemas de locomoción disponibles para robots móviles terrestres los clasifican en cinco categorías, figura 1:

- **Deslizantes:** La locomoción se realiza arrastrándose por el suelo, es decir, existe un contacto permanente con la superficie de desplazamiento. Algunos ejemplos son los robots tipo serpiente o gusano [Su, 2012], [Maruyama, 2010].
- **Rodantes:** La locomoción se realiza mediante ruedas. Normalmente este tipo de robots está destinado a desplazarse en superficies homogéneas y pierden eficiencia en terrenos irregulares. Algunos ejemplos de robots rodantes son [Trojnacki, 2015], [Martínez, 2012].

- **Rulantes:** La locomoción se realiza mediante cadenas u orugas. En términos de adaptabilidad al terreno son más eficientes que los robots rodantes. Algunos ejemplos de robots rulantes son [Velazquez 2011], [Dissanayake, 2017].
- **Caminadores:** La locomoción se realiza mediante patas o extremidades. La locomoción incrementa su grado de complejidad al tener que balancear el centro de masa del robot entre sus patas para mantener el equilibrio. Ejemplos de robots caminadores son los robots humanoides (bípedos), tetrápodos, hexápodos, etc. [Hernandez, 2017], [Fadli, 2016].
- **Otros:** La locomoción se realiza mediante mecanismos novedosos no convencionales, por ejemplo los robots saltarines [Haldane, 2017].

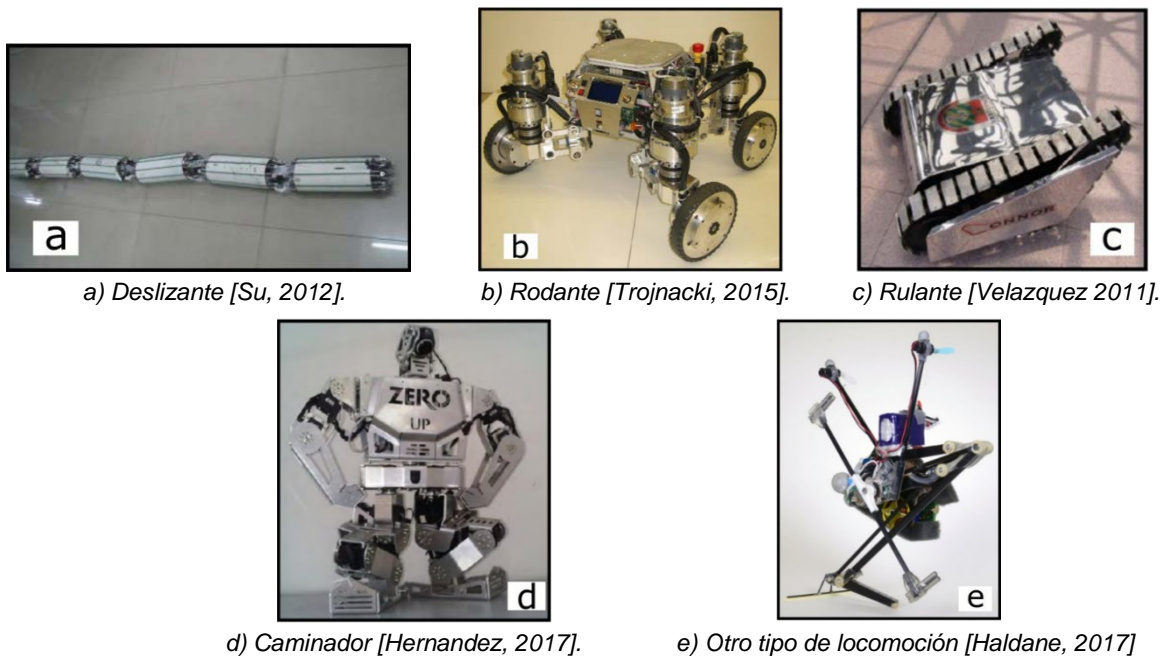


Figura 1 Ejemplos robots móviles terrestres de acuerdo a su sistema de locomoción.

En particular, los robots rodantes son relativamente simples, confiables, rápidos y eficientes. Desde la perspectiva de movilidad, los robots rodantes han demostrado una excelente maniobrabilidad. Ofrecen un mejor desempeño que las otras categorías en cuanto a velocidad, capacidad de carga y potencia gracias a la reducción de pérdidas por fricción y amplios rangos de operación. Sin embargo, no

representan la mejor solución cuando se requiere operar en terreno irregular. Es por ello que las actividades de investigación principales se han centrado en mejorar los sistemas mecánicos y actuadores de los robots así como en implementar técnicas nuevas de control [Grand, 2004], [Kim, 2013], [Tarvirdizadeh, 2018]. En este artículo se presenta el diseño y primer prototipo de un robot móvil resultado de los esfuerzos para desarrollar un vehículo con ruedas a bajo costo pero de alto desempeño usando una combinación de capacidades de visión por computadora, sensado ultrasónico y tele-operación.

2. Métodos

El alcance de los objetivos propuestos contempla una metodología de tres etapas: Diseño, modelado y construcción del robot móvil, Desarrollo de subsistemas y Validación experimental. En este artículo se abordan los dos primeros en su totalidad mientras que la validación experimental se acota a los modos de operación del robot. La figura 2 muestra el diseño conceptual del robot móvil a base de ruedas propuesto y el primer prototipo desarrollado. El concepto está basado en la configuración diferencial en la cual hay dos ruedas activas frontales y una rueda castor en la parte posterior.

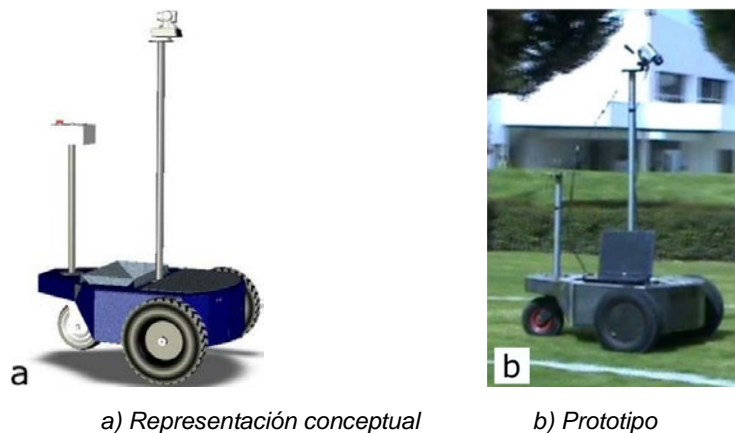
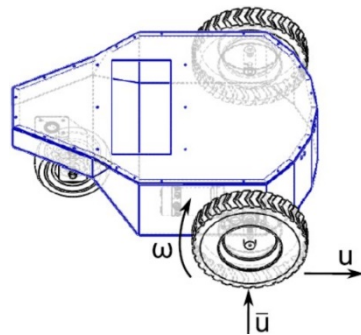


Figura 2 Plataforma propuesta.

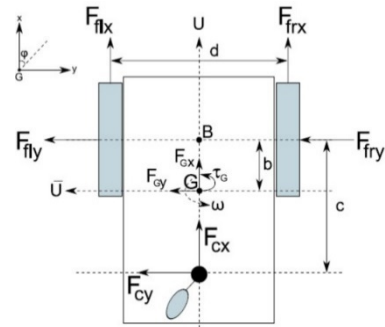
El prototipo final mide 108 cm de largo, 40 cm de alto, 100 cm de ancho y presenta una masa de 70 kg. Su carcasa de acero incluye en su interior todos los

componentes electrónicos como baterías, sensores, PCBs y subsistemas diversos. A la vez sirve como escudo protector a impactos potenciales por vibraciones cuando el robot se desplaza por terrenos difíciles. Adicionalmente la carcasa permite la operación en condiciones climáticas adversas como la lluvia, nubes de polvo, sol excesivo, etc. El modelo matemático que describe la dinámica del robot se resume a continuación y fue adaptado de un trabajo propio previo en sillas de ruedas robóticas [Romero, 2009].

La figura 3a muestra una representación esquemática del robot propuesto. Aquí, el robot puede ser representado como una estructura diferencial con 2 ruedas de tracción y una rueda loca o de castor. En la figura 3b, B representa el centro del eje que conecta ambas ruedas de tracción, G representa el centro de masa y por simplicidad, se considera el punto a controlar en posición (x, y) y orientación (ϕ) .



a) Estructura diferencial del robot móvil



b) Diagrama de cuerpo libre

Figura 3 Estructura diferencial del robot móvil y diagrama de cuerpo libre.

Las fuerzas y momentos resultantes en el robot se pueden expresar por las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\sum F_x = m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{rrx} + F_{rlx} + F_{crx} + F_{clx} + F_{Gx} \quad (1)$$

$$\sum F_y = m(\dot{\bar{u}} + u\omega) = F_{rry} + F_{rly} + F_{cry} + F_{cly} + F_{Gy} \quad (2)$$

$$\sum M_z = I\dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rrx} - F_{rlx}) - b(F_{rry} + F_{rly}) + (c - b)(F_{cry} + F_{cly}) + \frac{q}{2}(F_{crx} - F_{clx}) + \tau_G \quad (3)$$

Donde m es la masa del robot, I es el momento de inercia del robot rotando alrededor de G y u , \bar{u} y ω son las velocidades lineal, transversal deslizante y angular del robot, respectivamente (figura 3b).

La velocidad \bar{u} puede ser despreciada si se considera que las ruedas del robot no se deslizan durante el movimiento. Por su parte, u y ω se pueden expresar mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$u = \frac{1}{2}[r(\omega_r + \omega_l) + (u_r + u_l)] \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{d}[r(\omega_r - \omega_l) + (u_r - u_l)] \quad (5)$$

Donde r es el radio de las ruedas de tracción, d es la distancia entre las ruedas de tracción (ver figura 3(b)), ω_r y ω_l son las velocidades angulares de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente y u_r y u_l son las velocidades lineales de las ruedas derecha e izquierda, respectivamente.

La cinemática del punto G se relaciona con u y ω mediante las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$\dot{x} = u \cos \varphi - b \omega \sin \varphi \quad (6)$$

$$\dot{y} = u \sin \varphi + b \omega \cos \varphi \quad (7)$$

$$\dot{\varphi} = \omega \quad (8)$$

Como se mencionó, las ruedas de tracción son impulsadas por motores de DC. Éstos pueden ser modelados mediante las ecuaciones 9 y 10.

$$\tau_r = \frac{k_a}{R_a}(E_r - k_b \omega_r) \quad (9)$$

$$\tau_l = \frac{k_a}{R_a}(E_l - k_b \omega_l) \quad (10)$$

Donde τ_r y τ_l son los torques desarrollados por los motores en las ruedas derecha e izquierda a partir de los voltajes DC de entrada E_r y E_l , respectivamente; k_a y k_b son las constantes de torque y de fuerza contra-electromotriz del motor mientras que R_a es la resistencia eléctrica del motor. Por simplicidad, los voltajes inductivos han sido ignorados.

Las ecuaciones que describen el sistema rueda-motor se pueden escribir simplemente como (ecuaciones 11 y 12).

$$I_e \dot{\omega}_r + D_e \omega_r = \tau_r - F_{rrx} \hat{r} \quad (11)$$

$$I_e \dot{\omega}_l + D_e \omega_l = \tau_l - F_{rlx} \hat{r} \quad (12)$$

Donde I_e y D_e son el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa del sistema rueda-motor, respectivamente y \hat{r} es el radio nominal de los neumáticos de las ruedas de tracción. Usando y combinando las ecuaciones 1 a 12, la dinámica del robot se puede resumir en la ecuación 13.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \phi - b \omega \sin \phi \\ u \sin \phi + b \omega \cos \phi \\ \omega \\ \frac{a_3}{a_1} \hat{r} r \omega^2 - 2 \frac{a_4}{a_1} u \\ -2 \frac{a_3}{a_2} \hat{r} r u \omega - \frac{a_4}{a_2} d^2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{2r}{a_1} & 0 \\ 0 & \frac{2rd}{a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_u \\ E_\omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

Con las entradas:

$$E_u = \frac{E_r + E_l}{2} \quad y \quad E_\omega = \frac{E_r - E_l}{2}$$

Y las variables:

$$a_1 = \frac{R_a}{k_a} (m \hat{r} r + 2I_e), \quad a_2 = \frac{R_a}{k_a} [I_e d^2 + 2 \hat{r} r (I + m b^2)]$$

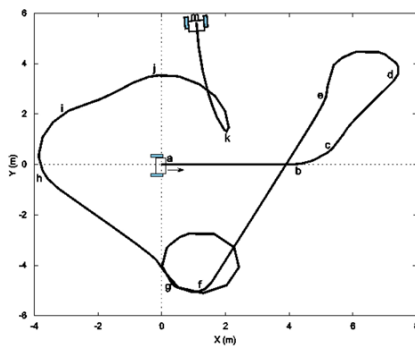
$$a_3 = \frac{R_a}{k_a} m b \quad y \quad a_4 = \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + D_e \right)$$

Observe que la ecuación 13 relaciona el movimiento del robot con el voltaje aplicado a los motores. Los valores de los parámetros que intervienen en el modelo pueden ser fácilmente medidos del prototipo y las especificaciones de los motores de DC empleados pueden ser obtenidos del fabricante (tabla 1).

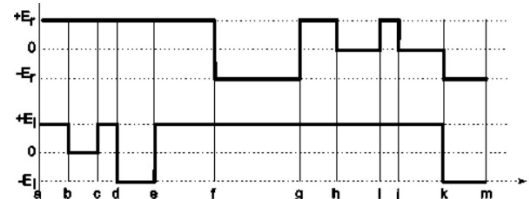
La figura 4a muestra cierta trayectoria del robot obtenida en plano XY usando la ecuación 13 y simulación por computadora usando software especializado como Matlab. La figura 4b muestra las señales eléctricas de control correspondientes aplicadas a los motores de DC.

Tabla 1 Parámetros involucrados en el modelo del robot.

Parámetro	Valor	Unidades
E_r, E_l	24	V
R_a	4	Ω
k_a	0.05	N-m/A
k_b	0.11	V-s/rad
m	70	kg
\hat{r}	0.05	m
r	0.065	m
I_e	0.75×10^{-4}	kg-m ²
d	0.236	m
I	113.47	kg-m ²
b	0.168	m
D_e	1×10^{-5}	N-m-s/rad



a) Trayectoria simulada.



b) Señales eléctricas de control

Figura 4 Trayectoria simulada y las señales eléctricas de control correspondientes.

Respecto al módulo electrónico, actuadores y sensores, todos se encuentran al interior de la carcasa (figura 5).

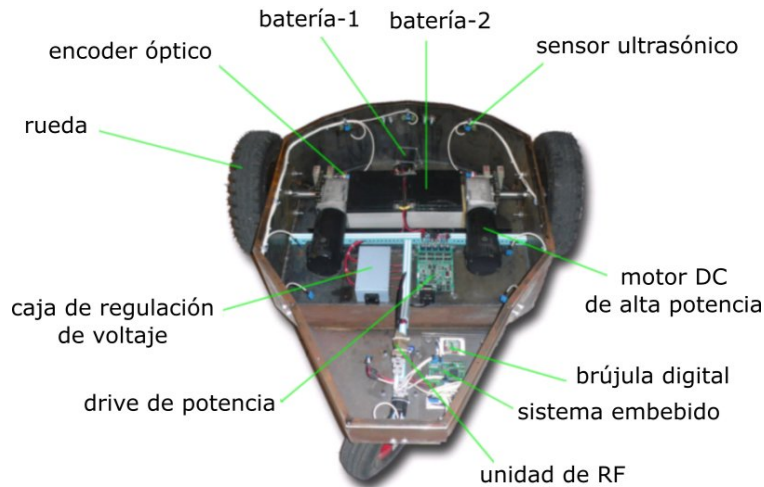


Figura 5 Sistemas a bordo de la plataforma móvil.

Dos motores de DC de alta potencia (24 V, 180 rpm, torque 55 N-m) se utilizan como actuadores principales del robot. Su control preciso se logra mediante señales de PWM (Modulación por Ancho de Pulso, por sus siglas en inglés). El control PWM permite operar el robot a muy bajas velocidades para aproximarse a objetos sin inducir vibraciones importantes en la estructura así como operar a altas velocidades (20 km/h) cuando se requiere.

Dos baterías recargables de plomo ácido (12 V, 12 A-h) conectadas en serie se usan para alimentar los motores (Batería 2, figura 5). Una batería más pequeña (12 V, 1.2 A-h) se utiliza para alimentar los componentes electrónicos (Batería 1, figura 5). El tiempo de autonomía del robot es de 40 min.

Un conjunto de ocho sensores ultrasónicos se colocaron alrededor de la estructura del robot y proveen un rango de escaneo de 360°. Estos sensores son capaces de detectar obstáculos ubicados a distancias de hasta 130 cm del cuerpo del robot.

Otro componente importante es el compás digital. Este sensor de muy bajo costo utiliza el campo magnético de la tierra para proveer una señal digital proporcional a su orientación respecto al Norte magnético. Este sensor asiste en la orientación del robot en tiempo real y se utiliza en navegación autónoma.

El sistema electrónico es el cerebro del robot y consiste en un sistema embebido OMAP3530 de Texas Instruments [Texas Instruments, 2020]. Éste genera las señales PWM para controlar los motores y el movimiento de la cámara. También es responsable de concentrar la información de los sensores ultrasónicos. Cuando el robot es tele-operado, el sistema embebido procesa la información enviada por el operador a través de un módulo de comunicaciones RF y ajusta las señales de control para regular la velocidad, orientación, posición de la cámara, entre otras.

Finalmente, un sistema comercial de RF [Sabban, 2016] se emplea para asegurar una comunicación bidireccional entre el sistema embebido y la estación remota. El sistema RF se conecta al sistema embebido usando protocolo serial RS232. A su vez, la estación remota posee un transceptor (es decir, transmisor y receptor a la vez) RF que emplea FSK (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia por sus siglas en inglés) para transmitir información hasta una distancia de 3.2 km en línea de vista o 450 m en interiores con paredes que bloquean la señal. El modulo RF

transmite señales FM a una frecuencia de 900 MHz. Este tipo de módulos de RF se ha utilizado en un proyecto previo de Tecnologías de Asistencia para personas invidentes [Velázquez, 2018] demostrando gran confiabilidad en la transmisión de datos.

3. Resultados

En esta sección se abordan dos aspectos importantes de la operación del robot: la navegación autónoma (basada en capacidades de visión por computadora) y la tele-operación.

Adicionalmente a los sensores descritos en la sección anterior, el robot incluye un sensor de video, el cual consiste en una cámara RGB estándar de resolución 120x160 pixeles que proporciona imágenes a color ya sea para la toma de decisiones o para la transmisión a una estación remota.

Una de las aplicaciones más populares de visión por computadora en robots móviles es el seguimiento de línea. Esta aplicación requiere que el robot siga una línea sólida y/o línea discontinua a lo largo de un camino evitando los obstáculos, superando los cambios del terreno y tratando de maximizar la velocidad. El desafío consiste en aplicar algoritmos confiables que funcionen bajo condiciones impredecibles y variantes de luminosidad, sombras, etc.

La figura 6 muestra un ejemplo representativo del seguimiento de línea bajo ciertas condiciones de luminosidad y sombras. La figura 6a muestra la imagen original obtenida por la cámara RGB. Nótese la presencia de sombras y un nivel de luminosidad que hace problemática la discriminación automática entre el suelo (pasto en este caso) y la línea blanca.

La figura 6b muestra la misma imagen con las sombras atenuadas. Esta imagen se obtuvo por una transformación de RGB a HSI, seguido de una rotación de 60° en el plano HS (de modo que el amarillo se convierta en rojo) y luego una transformación de vuelta a RGB. Para realzar los colores brillantes (azul) en la imagen, una transformación de RGB a gris se realizó usando $R+G+3B$ en lugar de la típica fórmula $(R+G+B)/3$ (figura 6(c)). A continuación, un umbral (threshold) se aplicó para identificar mejor los colores brillantes (figura 6(d)).

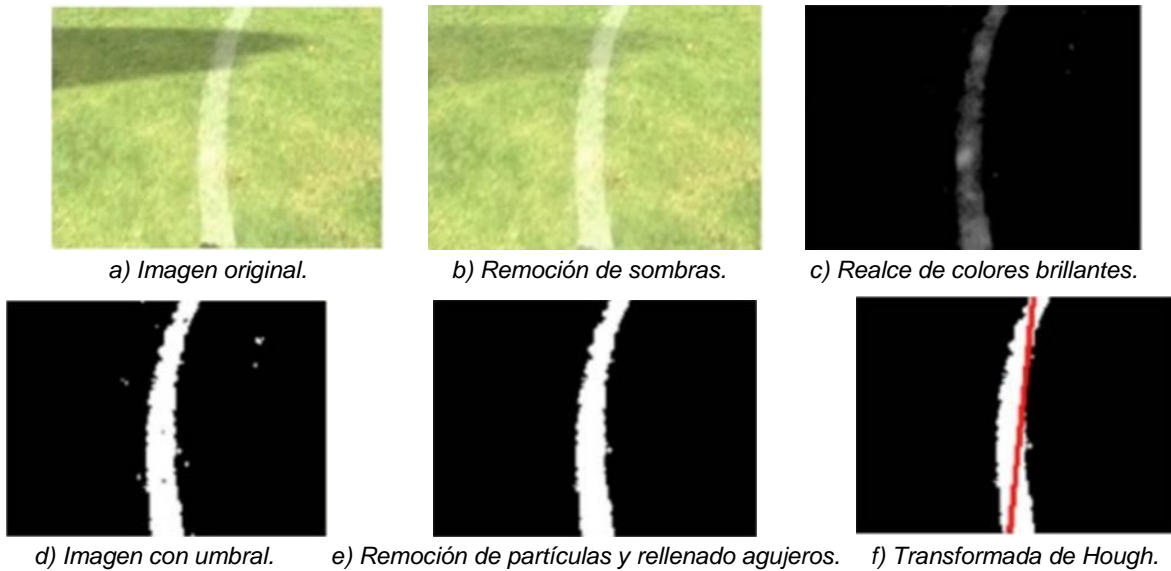


Figura 6 Procesamiento de imágenes para seguimiento de línea.

Para minimizar el número de objetos en la imagen y retener los de mayor densidad de masa, las vecindades aisladas de 3x3 se removieron y los agujeros de 3x3 se rellenaron (figura 6e). En esta etapa, la imagen ya es aceptable y la transformada de Hough puede aplicarse confiablemente (figura 6f).

Finalmente, la imagen resultante es procesada en un algoritmo implementado en JAVA para tomar la mejor decisión basada en las líneas encontradas. Todo el procesamiento de imágenes se realiza en una computadora portátil a bordo del robot (Figura 2a).

Para incrementar las capacidades de manipulación del robot, se ha implementado el modo de tele-operación en el cual el operador toma el control del robot y la cámara. Para este modo se ha puesto especial cuidado en que la operación del robot se haga de manera intuitiva, sin que el operador tenga que ejercer demasiado trabajo ni le demande alta carga cognitiva.

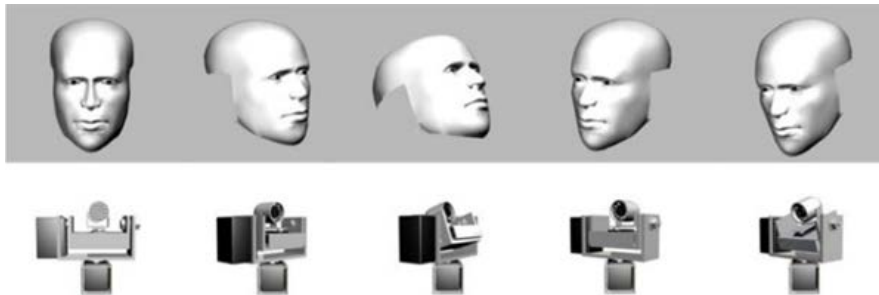
El sistema de tele-operación consiste en dos elementos principales: un caso de realidad virtual (RV) y un dispositivo háptico kinestésico.

Respecto al casco de realidad virtual, actualmente se está utilizando el dispositivo Emagin Z3800 3Dvisor, figura 7a. Se trata de un dispositivo compacto, ligero y de bajo costo ideal para esta aplicación. El casco de RV contiene dos pantallas activas de video capaces de desplegar ambientes estereoscópicos reales [Velázquez,

2016]. El casco de RV contiene una IMU (Unidad Inercial de Movimiento, por sus siglas en inglés) capaz de discernir movimientos de la cabeza en el espacio 3D. Estos movimientos se usan para tele-operar la plataforma sobre la cual está montada la cámara del robot. Dicha plataforma es un mecanismo PTZ (pan-and-tilt) de 2 GDL (grados de libertad) como se puede observar en la figura 7b. La figura 7c muestra la manipulación de la plataforma usando el casco de RV. Usando la IMU del casco y una frecuencia de muestreo de 100 Hz, tres aceleraciones en cada uno de los ejes (x,y,z) se identifican y se calculan las respectivas posiciones mismas que se transmiten a la plataforma sobre el robot usando el módulo de comunicación RF.



a) Representación conceptual del operador con el casco b) Plataforma PTZ y montaje de la cámara RGB.



c) Ejemplos de manipulación de la cámara con el casco de RV

Figura 7 Modo tele-operación: casco de RV.

El segundo componente que soporta el modo de tele-operación es un dispositivo háptico kinestésico (figura 8). Estos dispositivos son manipuladores de n-GDL que permiten al usuario aplicar y/o recibir fuerzas y movimientos. Este intercambio de fuerzas y movimientos proporciona retroalimentación al operador. Además de la tele-operación, el modo háptico kinestésico de interacción ha generado un interés considerable en campos como la robótica, rehabilitación, manipulación de objetos, realidad virtual, juegos, educación y entrenamiento, entre otros [Rodríguez, 2012].

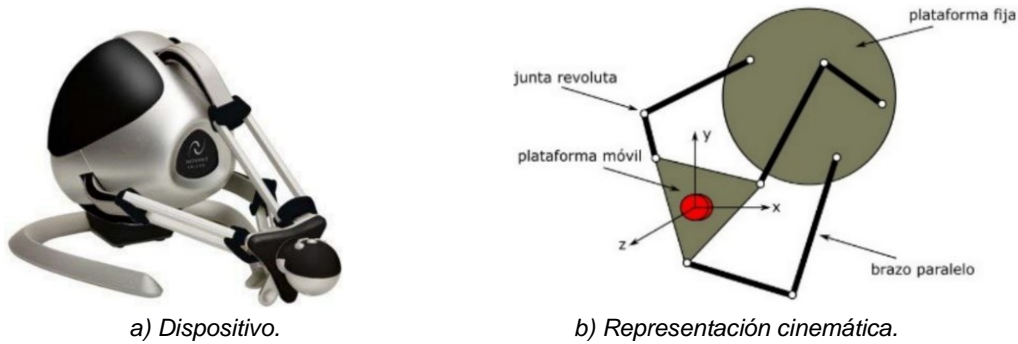


Figura 8 Novint Falcon.

El dispositivo usado en este proyecto es el Novint Falcon (figura 8(a)), un dispositivo háptico de 3-GDL que utiliza una configuración de robot-delta con 3 brazos o eslabones operados por servomotores conectados a una plataforma móvil (figura 8(b)). Todas las articulaciones en el Falcon son juntas revolutas de 1-GDL. Toda la información entre el dispositivo y la computadora de la estación remota se transmite por medio del puerto USB. El Falcon envía su posición a la computadora, la cual se transmite por el modulo RF al robot. Si los sensores ultrasónicos dispuestos alrededor del robot indican la presencia próxima de un objeto o una inminente colisión, se envía la información a la estación remota la cual regresa un vector de fuerza al usuario para indicar que se ha topado con un objeto. Este tipo de lenguaje táctil es muy intuitivo, es innato en el ser humano y no necesita de ningún aprendizaje [Velázquez, 2014]. El lazo posición dispositivo-sensor ultrasónico-vector de fuerza se actualiza a una frecuencia de 1 kHz.

4. Discusión

La tracción diferencial que exhibe la plataforma facilita en gran medida el control del robot para sus dos modos de operación: autónomo (mediante visión por computadora) y tele-operación.

Si se desea avanzar, se asigna el mismo voltaje a ambos motores ($E_l = E_r$). Caso contrario, retroceder, se asigna el mismo voltaje a ambos motores pero con signo negativo ($-E_l = -E_r$). Si se desea girar a la izquierda simplemente se apaga el voltaje del motor izquierdo ($E_l = 0$). Caso contrario, es decir, girar a la derecha, se apaga el voltaje del motor derecho ($E_r = 0$). Si se desea girar sobre el mismo eje,

se asigna el mismo voltaje a los motores pero con signo contrario ($E_r = +V$, $E_l = -V$ o $E_r = -V$, $E_l = +V$). Este número reducido de combinaciones abarcan cualquier movimiento y permite acoplar fácilmente dispositivos de sensado e interacción como los sensores ultrasónicos, las cámaras de video y dispositivos hápticos pues finalmente se trata de asignar dos voltajes en los motores.

La magnitud de dichos voltajes debe tener especial cuidado sobre todo para valores pequeños que producen velocidades bajas y desplazamientos cortos pues indican vibraciones en las estructuras. Un método de contrapesos inspirado de mecanismos a barras se encuentra en estudio para reducir o eliminar el efecto de vibraciones en la estructura del robot [Orvañanos, 2019].

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado el diseño, modelado y primer prototipo de un robot móvil con capacidades de navegación autónoma y tele-operación.

La simplicidad de su diseño mecánico junto con el uso de materiales comúnmente disponibles ofrece múltiples ventajas como un prototipado rápido y un bajo costo.

El sistema de propulsión mediante motores de DC ofrece alta potencia, excelente maniobrabilidad y simplicidad en el control.

El prototipo intenta proveer una solución eficiente para la exploración de distintos terrenos, seguridad, vigilancia, defensa, rescate, entre otras así como servir de plataforma educativa para probar distintos algoritmos de navegación y control basándose en los sensores disponibles en su estructura.

Una cámara de video, un arreglo de sensores ultrasónicos y un módulo de comunicaciones RF incrementan las capacidades operacionales del robot permitiendo la navegación autónoma y la operación remota del robot incluso a varios kilómetros de distancia.

Las capacidades de visión por computadora y el módulo de tele-operación fueron descritos.

En particular, el modo de tele-operación ofrece una interacción intuitiva mediante movimientos de la cabeza y del brazo para incrementar la funcionalidad del lazo hombre-máquina.

Entre las líneas a explorar en trabajos futuros se encuentra la implementación de algoritmos de inteligencia artificial para la detección y el reconocimiento de objetos de interés así como algoritmos bio-inspirados para sortear eficientemente obstáculos y planificar trayectorias [Maingreud, 2004], [Zhang, 2012].

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Dissanayake M., Sattar T. P., Howlader O., Pinson I. & Gan T. Tracked-Wheel Crawler Robot for Vertically Aligned Mooring Chain Climbing Design, Simulation and Validation of a Climbing Robot for Mooring Chains. IEEE International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka, December, 2017.
- [2] Fadli H., Hidayat E. & Machbub C. Design and Implementation of Walking Pattern and Trajectory Compensator of NAO Humanoid Robot. International Conference on System Engineering and Technology, Bandung, Indonesia, October, 2016.
- [3] Grand C., BenAmar F., Plumet F., Bidaud P. Stability and Traction Optimization of Reconfigurable Vehicles: Applications to a Hybrid Wheel-Legged Robot. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 10-11, 1041–1058, 2004.
- [4] Haldane D. W., Yim J. K., & Fearing R. S. Repetitive Extreme-Acceleration (14-g) Spatial Jumping with Salto-1P. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, Canada, September, 2016.
- [5] Hernandez E., Velazquez R., Macías Quijas R., Pissaloux E., Giannoccaro N. I. & Lay-Ekuakille A. Kinematic Computations for Small-Size Humanoid Robot KUBO. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, 7311-7320, 2017.
- [6] Kim S. & Kwon S. Nonlinear Control Design for a Two-Wheeled Balancing Robot, International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Jeju, Korea, December, 2013.
- [7] Maingreud F., Pissaloux E. & Velazquez R. Dynamic Electronic Map of 3D Space Representation: An Approach to Obstacle Avoidance of Visually

- Impaired. 2004 IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa, Gaborone, Botswana, September, 2004.
- [8] Martínez J. S., Morán G., Romero B., Camacho A., Gutheim D., Varona J. & Velazquez R. Multifunction All-Terrain Mobile Robot IVWAN: Design and First Prototype, 2nd Israeli Conference on Robotics. Herzlia, Israel, November, 2008.
- [9] Maruyama H. & Ito K. Semi-autonomous Snake-like Robot for Search and Rescue. 2010 IEEE Safety Security and Rescue Robotics. Bremen, Germany, July 2010.
- [10] Orvañanos T., Sánchez C., Rivera M., Acevedo M., Velazquez R. Gradient Descent-Based Optimization Method of a Four-Bar Mechanism Using Fully Cartesian Coordinates. *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, 4115, 1-26, 2019.
- [11] Rodríguez J. L. & Velazquez R. Haptic Rendering of Virtual Shapes with the Novint Falcon, *Procedia Technology*, vol. 3, 132-138, 2012.
- [12] Romero B., Camacho A., Varona J., Delgado Mata C., Velazquez R. A Low-Cost Electric Power Wheelchair with Manual and Vision-Based Control Systems. AFRICON 2009, Nairobi, Kenya, September, 2009.
- [13] Sabban A. *Wideband RF Technologies and Antennas in Microwave Frequencies*, 1st Ed., John Wiley & Sons, 2016.
- [14] Su X., Zhao Z., Wu Q. & Huang C. Structural Analysis and Design of Round Belt Drive Snake-Like Robot. IET International Conference on Information Science and Control Engineering. Shenzhen, China. December, 2012.
- [15] Tarvirdizadeh B., Spanogianopoulos S. & Alipour K. Control of Nonholonomic Electrically-Driven Tractor-Trailer Wheeled Robots based on Adaptive Partial Linearization. 2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics. Tehran, Iran. October, 2018.
- [16] Texas Instruments. Especificaciones OMAP3530, (2020): <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/omap3530.pdf>.
- [17] Trojnacki M. & Dabek P. Determination of Motion Parameters with Inertial Measurement Units – Part 1: Mathematical Formulation of the Algorithm. In: Awrejcewicz J., Szewczyk R., Trojnacki M., Kaliczyńska M. (eds)

- Mechatronics - Ideas for Industrial Application. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 317. Springer, Cham, 2015.
- [18] Velazquez R. & Lay-Ekuakille A. Modeling review of structures and locomotion systems for mobile robots: Four case studies, 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Binjiang, China, July, 2011.
- [19] Velazquez R. & Pissaloux E. On Human Performance in Tactile Language Learning and Tactile Memory. IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Edinburgh, UK, August, 2014.
- [20] Velazquez R., Sánchez C. & Pissaloux E. Visual Impairment Simulator Based on the Hadamard Product, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 329, 169-179, 2016.
- [21] Velazquez R. Pissaloux E., Rodrigo P., Carrasco M., Giannoccaro N.I. & Lay-Ekuakille, A. An Outdoor Navigation System for Blind Pedestrians Using GPS and Tactile-Foot Feedback. *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, 578, 1-15, 2018.
- [22] Zhang Z. & Xiong Y. An Improvement Approach based on Linear Navigation Law for Mobile Robot. 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Zhangjiajie, China, August, 2012.