

# ROBOT MÓVIL 3.0 UNA EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO

***Saul Enrique Benítez García***

Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC

*sbenitezg1100@egresado.ipn.mx*

***Jorge Luis de la Cruz Osorio***

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacan

*jdelacruz1100@egresado.ipn.mx*

***Miguel Gabriel Villarreal Cervantes***

Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC

*mvillarrealc@ipn.mx*

## Resumen

En la actualidad existe una gran demanda de sistemas robóticos que presenten un alto grado de precisión y repetibilidad con el propósito de obtener productos de mejor calidad. Uno de los aspectos claves para desarrollar sistemas con un buen desempeño es el sistema de posicionamiento y control. Por tal motivo en el presente trabajo se expone la evaluación de rendimiento de un sistema de posicionamiento con base en odometría y el sistema de control de un robot móvil 3.0. La evaluación del sistema de control se obtiene con base en el cálculo de la repetibilidad, obtenido a través del sistema de odometría del robot móvil. Por otra parte, la exactitud del sistema de localización con base en odometría se compara con los resultados obtenidos de un sistema de localización de faros activos basado en cámaras. Bajo el estándar internacional ISO-9283 se observa que la repetibilidad y la exactitud del robot móvil son apropiadas.

**Palabras Claves:** Exactitud, ISO-9283, repetibilidad, robot móvil 3.0, sistema de localización.

## **Abstract**

*Nowadays, robotic systems with a high accuracy and repeatability are highly used due to the requirement to obtain a superior quality in the final product. One of the main issue to carry out systems with “good” performance is the positioning and control system. For this reason, a positioning performance evaluation based on both odometry and control system of a 3.0 mobile robot, is presented in this work. The control performance evaluation is obtained by computing the repeatability using the obtained result from the odometry system of the mobile robot. On the other hand, the performance of the location system based on odometry is compared by the results obtained with a camera based active beacon location system in order to determine its accuracy. Using the International Standard ISO-9283, the repeatability and accuracy of the mobile robot is suitable.*

**Keywords:** *Accuracy, ISO-9283, location system, mobile robot 3.0, repeatability.*

## **1. Introducción**

Actualmente gracias a los avances tecnológicos en sistemas de medición, actuadores, sistemas de cómputo, sistemas de comunicación y sistemas de energía, han permitido que se mantenga un fuerte interés por la robótica móvil terrestre [Guerrero, et al., 2014], y en particular en el robot móvil 3.0. Este particular interés se debe a que es un robot holónimo que presenta tres grados de movilidad y no contempla grado de direccionalidad, por tal motivo posee total movilidad en el plano, es decir, que tiene la capacidad de moverse en cada instante de tiempo a cualquier dirección independientemente de su orientación [Campion, et al., 1996].

Por otro lado, en robótica móvil, se considera el problema de localización como la parte clave de dichos sistemas, dado que para que un robot móvil navegue de forma autónoma debe tener la capacidad de determinar o estimar su posición y orientación en relación con su entorno, además de conocer la posición de otros objetos o características de interés en el ambiente del robot. Con el propósito de realizar estas acciones los robots móviles utilizan un sistema de posicionamiento que puede ser de tipo absoluto o relativo [Borenstein, et al., 1996] o ambos con la

finalidad de obtener mayor fiabilidad su localización como se muestra en [Fu, et al., 2013]. En [Sin, 2007] se hace uso del GPS (del inglés Global Positioning System) para desarrollar un robot móvil que opere de manera autónoma y manual con el fin de patrullar las calles. Para la localización de un robot AIBO en [Huang, et al., 2006] se propone un método de posicionamiento absoluto configurando 4 altavoces como faros activos de sonido en una posición conocida. En [Guerrero, et al., 2014] se utiliza como sistema de localización absoluta con base en odometría, abordando el problema de seguimiento de trayectorias para un robot móvil basado en su modelo cinemático. Por tal motivo, en este trabajo se presenta la evaluación del sistema de posicionamiento con base en odometría y el sistema de control de un robot móvil 3.0 en un ambiente controlado, asumiendo que se conoce la posición cartesiana inicial y que las ruedas no deslizan. El rendimiento que presenta el robot móvil se determina con base en los parámetros de repetibilidad y exactitud que exhibe dicho sistema.

El resto del documento se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se describe el modelo cinemático del robot móvil 3.0 y el controlador empleado. En la sección 3 se realiza un análisis del sistema de posicionamiento global con base en odometría. En la sección 4 se exponen las características de la plataforma experimental. La evaluación del rendimiento que presenta el sistema de control y el sistema de posicionamiento del robot móvil 3.0 se presenta en la sección 5 y finalmente en la sección 6 se exhiben las conclusiones del trabajo.

## **2. Métodos**

El desarrollo y explicación del modelo cinemático y dinámico del robot móvil 3.0 es obtenido de [Canudas, et al., 1996] y [Villarreal, 2015] donde se considera que el robot móvil está fabricado como una estructura rígida y que sus ruedas se desplazan sobre un plano horizontal, sin presentar deformaciones y deslizamiento en el punto de contacto.

### **Modelo Cinemático**

La representación esquemática del robot móvil se presenta en la figura1, donde la posición y orientación del robot móvil se representa con el sistema de

coordenadas relativo de movimiento  $\{m_f\}$ , que se encuentra fijo en el centro de geométrico del robot móvil; y para representar el desplazamiento absoluto del robot móvil se utiliza el sistema de coordenadas  $\{\omega_f\}$ , que se encuentra fijo al plano. Siendo  $\dot{\eta}_m = [\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\phi}_m]^T$  y  $\dot{\eta}_w = [\dot{x}_w, \dot{y}_w, \dot{\phi}_w]^T$  las velocidades lineales y angulares en el sistema de coordenadas de movimiento y en el sistema de coordenadas absoluto respectivamente. Considerando que las ruedas 1 y 3 tienen un ángulo simétrico de  $\delta = \frac{\pi}{3}$  con respecto al eje  $Y_m$  y la rueda 2 se encuentra alineado con el eje  $X_m$ , es posible representar el modelo cinemático como se muestra en la ecuación 1.

$$\dot{\eta}_w = \begin{bmatrix} \cos(\phi_w) & -\sin(\phi_w) & 0 \\ \sin(\phi_w) & \cos(\phi_w) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{\eta}_m \quad (1)$$

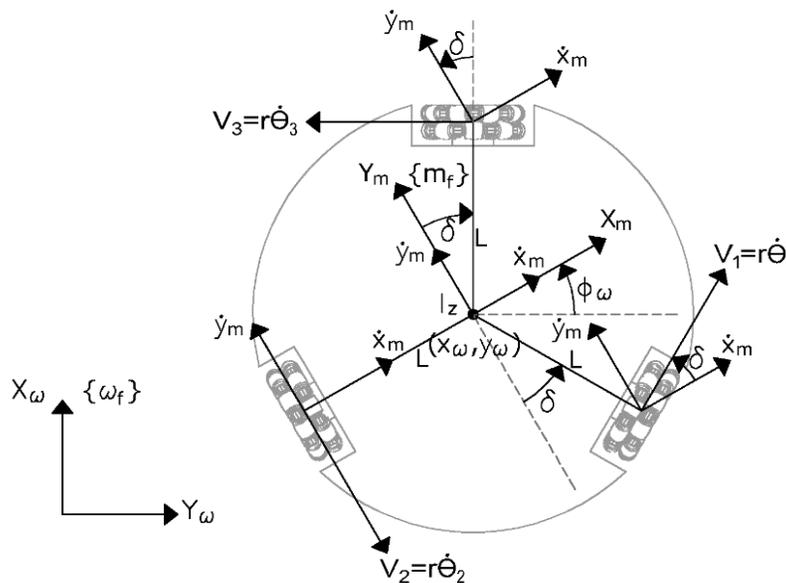


Figura 1 Diagrama esquemático del robot móvil 3.0.

El mapeo entre la velocidad lineal de las llantas y la velocidad angular y lineal en el sistema coordinado del robot móvil está dada por la ecuación 2, donde  $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$  es la velocidad angular de cada rueda,  $R = [r, r, r]^T = [0.0508m., 0.0508m., 0.0508m.]^T$  el radio de cada rueda y

$L = 0.1847m$ . la distancia del centro geométrico del robot móvil al centro de la rueda.

$$R\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\phi}_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

### Controlador PD

Considerando el problema de regulación, sea  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$  la representación en el espacio de estados del modelo dinámico del robot móvil y  $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$  como el vector de estados del robot móvil, se propone el controlador presentado en la ecuación (3), donde el vector de par de fuerzas de entrada en las ruedas esta definida por  $u = [u_1, u_2, u_3]^T$  y considerando  $\bar{v} = k_p e + k_d \dot{e}$ , donde  $e = [\bar{x}_d - x_1, \bar{y}_d - x_2, \bar{\phi}_d - x_3]^T$  es el error de posición lineal y angular del móvil entre la posición deseada  $\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{\phi}_d$  y los estados reales del sistema  $x_1, x_2, x_3, e = [\dot{\bar{x}}_d - x_4, \dot{\bar{y}}_d - x_5, \dot{\bar{\phi}}_d - x_6]^T$  es la velocidad de cambio del error y  $k_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}) \in R^{3 \times 3}$ ,  $k_d = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}) \in R^{3 \times 3}$  son matrices diagonales definidas positivas que almacenan las ganancias proporcional y derivativa del controlador.

$$u = J^T \bar{v} \quad (3)$$

Cabe mencionar que las ganancias proporcionales  $k_p = \text{diag}(11, 11, 2.4)$  y derivativa  $k_d = \text{diag}(3, 3, 2.3)$ , fueron obtenidas bajo el enfoque heurístico mostrado en [Villarreal, 2012], donde se realiza la sintonización del controlador mediante experimentación y la observación de los mejores resultados.

### Sistema de Posicionamiento Absoluto con Base en Odometría

En el presente trabajo para proporcionar de autonomía al robot móvil, se ha implementado un sistema de posicionamiento absoluto con base en odometría

debido a que brinda una buena precisión a corto plazo, es de bajo costo y permite altas frecuencias de muestreo, como es el caso que se presenta en [Guerrero, et al., 2014], donde se ha utilizado dicho sistema para la localización del robot móvil. Este sistema de posicionamiento es sencillo de implementar debido a que esta con base en ecuaciones que transforman el número de revoluciones de las ruedas en desplazamientos lineales relativos al suelo, considerando una condición de partida definida previamente por el usuario.

Asumiendo que el robot móvil se encuentra en un ambiente controlado, es decir, el espacio de trabajo es una superficie totalmente plana y sin inclinaciones, no existe deslizamiento de las ruedas, y los parámetros cinemáticos del robot móvil presentan una adecuada caracterización, el sistema de posicionamiento con base en odometría es una opción factible. Es bien conocido que al no tomar en cuenta la consideración anteriormente comentada y al no contemplar referencias externas de posicionamiento se genera una acumulación de error considerable. Para la corrección de este error se requiere la implementación de sistemas de procesamiento y medición de alta velocidad y precisión, o bien implementar métodos recientemente desarrollados en múltiples investigaciones, como es el caso que se presenta en [Xu, 2009], donde hace uso de redes neuronales para la calibración y corrección de errores en el sistema de odometría y a su vez realiza un reconocimiento del ambiente en el que se encuentra operando.

Para que el sistema de odometría determine la posición del robot móvil, es requerida una lectura continua de los pulsos generados por los codificadores rotatorios para estimar el desplazamiento lineal de cada rueda a partir de sus respectivos desplazamientos angulares. El esquema mostrado en la figura 2 se representa el funcionamiento general del giro de un motor, el efecto de reducción y el desplazamiento lineal de la rueda.

Dónde:  $q_i$  representa el desplazamiento angular del  $i$ -ésimo motor,  $M = 51$  la relación de movimiento entre la entrada y la salida de la caja de engranajes,  $r$  el radio de la rueda,  $\theta_i$  y  $\Delta S_i$  es el desplazamiento angular y lineal de la  $i$ -ésima rueda, respectivamente. Para el caso de interés se tiene que  $i = 1, 2, 3$ .

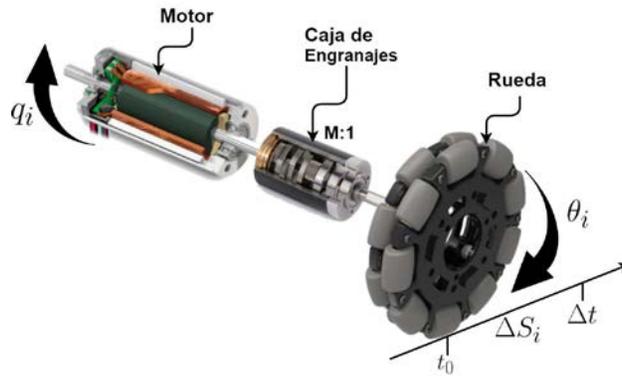


Figura 2 Diagrama esquemático del acoplamiento rueda, caja de engranes y motor.

Por otro lado, se ha considerado que la relación  $M$  y el radio de la rueda  $r$ , es el mismo para cada motor y rueda respectivamente.

El desplazamiento angular  $\theta_i$  es obtenido con base en el desplazamiento angular  $q_i$  de  $i$ -ésimo motor, o de pulsos  $N_p^i$  de la  $i$ -ésima rueda en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , como se muestra en la ecuación 4 donde  $P_v = 256$  es el número de pulsos por vuelta generados por el codificador rotatorio.

$$\theta_i = \frac{q_i}{M} = 2\pi \left( \frac{N_p^i}{P_v M} \right) \quad (4)$$

La transformación de desplazamiento angular a desplazamiento lineal esta dado por la ecuación 5.

$$\Delta S_i = r [\theta_i(t) - \theta_i(t - \Delta t)] = r \Delta \theta_i(t) \quad (5)$$

De las ecuaciones 1 y 2 del modelo cinemático del robot móvil, se obtiene la ecuación 6, que representa las velocidades del robot móvil en el espacio de operación en función del desplazamiento lineal de cada una de las ruedas.

$$\dot{\eta}_w = \begin{bmatrix} \cos(\phi_w) & -\sin(\phi_w) & 0 \\ \sin(\phi_w) & \cos(\phi_w) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix}^{-1} R \dot{\theta} \quad (6)$$

Realizando una integración numérica, se obtienen las ecuaciones 7, 8 y 9 para determinar la posición absoluta del robot móvil el sistema coordenado  $\{\omega_f\}$  para cada intervalo de tiempo. Donde  $x_{wi}$ ,  $y_{wi}$ , y  $\phi_{wi}$  representan las condiciones iniciales.

$$x_1(t + \Delta t) = x_{wi} - \frac{\Delta S_1}{3} (\sin \phi_w - \sqrt{3} \cos \phi_w) - \frac{\Delta S_3}{3} (\sin \phi_w - \sqrt{3} \cos \phi_w) + \frac{2\Delta S_2}{3} \sin \phi_w \quad (7)$$

## Plataforma Experimental

EL robot móvil cuenta con una estructura base rígida, que fue manufacturada en aluminio debido a que es un material resistente y de alta durabilidad; además de ser ligero, de bajo costo y presenta una alta resistencia a la corrosión. Por otro lado el robot cuenta con una cubierta de acrílico negro de **6mm**, proporcionándole protección y estética. Las dimensiones características del robot móvil (figura 3) en altura y radio son de **0.23 m** y **0.215 m** respectivamente.



Figura 3 Plataforma Experimental.

El prototipo experimental cuenta con una interfaz de comunicación y cuatro subsistemas, figura 4:

- Interfaz de comunicación: La interfaz de comunicación emplea una computadora con MATLAB y un dispositivo de radio frecuencia XBee-Serie-1 para realizar la inicialización de variables y el registro del comportamiento de la plataforma experimental de forma inalámbrica.
- Subsistema de energía: El subsistema de energía cuenta con dos modos de operación: con baterías internas o con fuente externa de alimentación de Corriente Directa (CD), donde el modo de operación es seleccionado mediante un interruptor eléctrico. Durante el modo de operación por fuente externa es posible realizar la carga correspondiente de las baterías internas, esto con la finalidad de seguir operando el prototipo y evitar contratiempos. Por otro lado, se utilizó un convertidor tipo Buck Pololu

D24V22F5 de 5 V a 2.5 A, que proporciona el voltaje y corriente adecuados para los elementos electrónicos

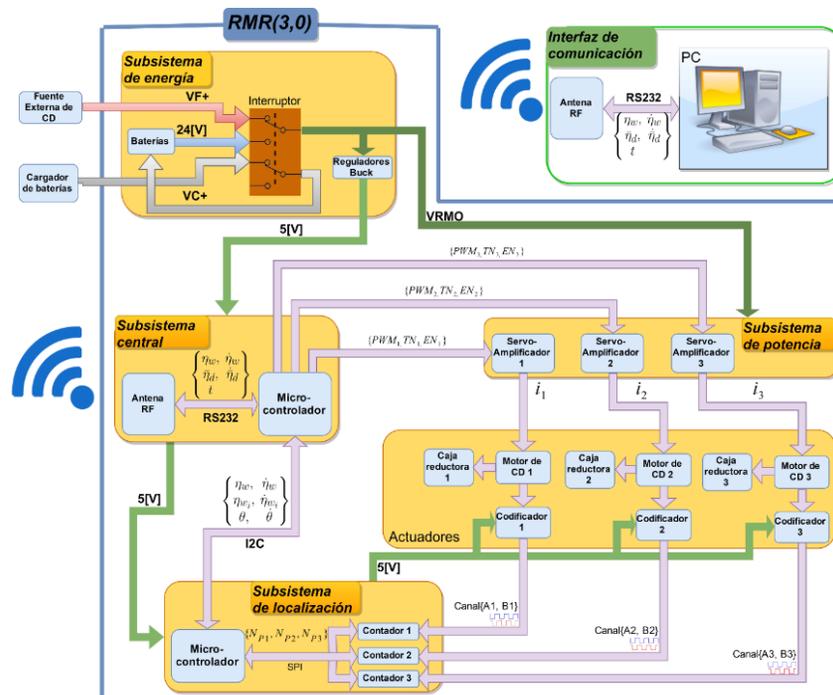


Figura 4 Diagrama del sistema de control.

- Subsistema de localización: El funcionamiento de este subsistema esta con base en dos etapas:
  - ✓ Etapa de adquisición de datos, donde se realiza la lectura de las tres señales de los codificadores ópticos acoplados a los motores y por medio del circuito integrado (C.I.) LS7366R, se convierten en un número entero de 16 bits, el cual contiene el número de pulsos generados por el codificador. El número de pulsos es enviado a la siguiente etapa de estimación de estado mediante el protocolo de comunicación SPI (Serial Pheriferal Interface por sus siglas en inglés).
  - ✓ Etapa de estimación de posición, en donde se estiman los estados actuales del robot móvil a partir del número de pulso  $N_p^i$  obtenidos en la etapa anterior. El vector de estados actuales  $x$  es enviado

mediante el protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrate Circuit por sus siglas en inglés) al subsistema central. Para este proceso se hace uso del micro-controlador ( $\mu C$ ) ATmega328P.

- Subsistema central: Dividido en dos etapas que son realizadas en un  $\mu C$  ATmega328P:
  - ✓ La etapa de procesamiento, hace uso de un  $\mu C$  ATmega328P encargado de solicitar de datos al sistema de localización, prosigue con el cálculo de la señal de control necesaria para realizar una tarea específica y transformar este resultado en señales PWM equivalente a la corriente necesaria para producir dicho par con base en la ecuación 10 que resulta del modelo estático del motor, donde  $K_m = 0.0389 \text{ Nm/A}$  es la constante de fuerza del motor de CD,  $i_a$  es la corriente de armadura y  $M = 51$  es la reducción de la caja de engranes.
  - ✓ La etapa de envío de datos, hace uso de una antena RF Xbee-Serie-1 para la transmisión de los estados reales  $x$  a la interfaz de monitoreo.

$$\tau = K_m i_a M \quad (10)$$

- Subsistema de potencia: Este proporciona la potencia eléctrica necesaria para producir movimiento en los motores de CD y que a su vez produzcan un desplazamiento del robot móvil en el plano. Este subsistema se compone por tres servo-amplificador ESCON 50/5 que realizan la interpretación de la señal PWM (generada por el subsistema central) y convertirla en corriente que es suministrada a cada motor de CD del robot móvil.

### 3. Resultados

En esta sección se evalúa el rendimiento del sistema de control y el sistema de posicionamiento con base en las ecuaciones de repetibilidad y exactitud que se encuentran en el estándar ISO-9283 [Standarization, 1991]. El rendimiento del

sistema de control se evaluó con base en el parámetro de repetibilidad, que a su vez es calculado a partir de los resultados del sistema de odometría. Por otro lado evaluación del sistema de posicionamiento se determinó a partir de la exactitud calculada de los datos adquiridos por un sistema de localización de faros activos basado en cámaras. Para evaluar dichos parámetros se consideró un tiempo de muestreo de  $\Delta t = 5\text{ms}$  y condiciones iniciales del robot móvil  $x_{wi} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ .

### Resultados del Sistema de Posicionamiento

Se propone posicionar al robot móvil en cuatro coordenadas cartesianas con una orientación desfasada  $\phi_w = \frac{\pi}{2} \text{rad}$  entre cada una de ellas, de manera que estas cuatro coordenadas cartesianas formen los vértices de un cuadrado de 1m por lado. Los estados correspondientes a cada una de las coordenadas deseadas son:

$$P_1: \bar{x}_d = [0.5, 0.5, 0, 0, 0, 0], \quad P_2: \bar{x}_d = [-0.5, 0.5, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0], \\ P_3: \bar{x}_d = [-0.5, -0.5, \pi, 0, 0, 0] \text{ y } P_4: \bar{x}_d = [0.5, -0.5, \frac{3\pi}{2}, 0, 0, 0].$$

Cabe mencionar que el tiempo máximo asignado para posicionarse en cada coordenada es de 8s. En la figura 5a se muestran las coordenadas cartesianas deseadas en superposición con el desplazamiento realizado por el robot móvil para posicionarse en cada una de las cuatro coordenadas cartesianas y en la figura 5b se presenta el comportamiento del robot móvil en orientación con su respectiva orientación deseada.

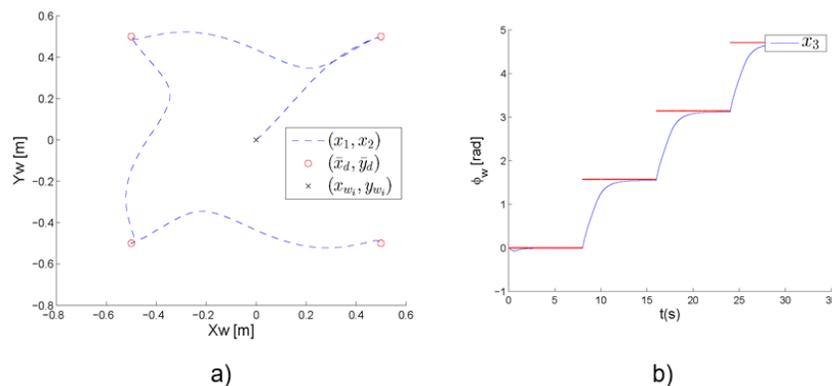


Figura 5 Comportamiento del robot móvil.

En la figura 6 se observa el error en la regulación dada por el sistema de control de  $e = [\pm 0.002m, \pm 0.001m, \pm 0.032rad]$  en  $x_1, x_2$  y  $x_3$  respectivamente.

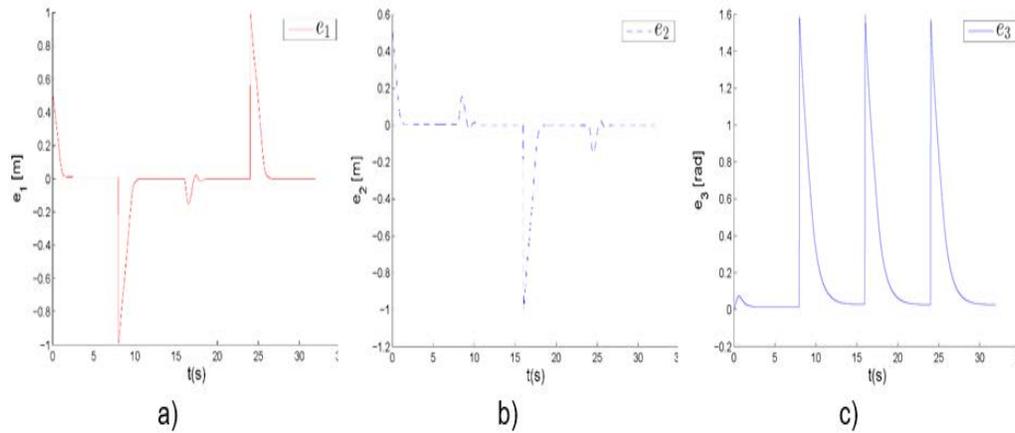


Figura 6 Error en  $x_w$ , Error en  $y_w$ . Error en  $\phi_w$ .

### Repetibilidad

La repetibilidad expresa el grado de concordancia entre las posturas alcanzadas por el robot móvil, después de  $m$  repeticiones, y la postura de referencia. Para  $m$  posturas conocidas, la repetibilidad se obtiene de acuerdo con las ecuaciones 11 y 12, donde  $RP_l$  y  $RP_\alpha$  es la repetibilidad en posición y orientación respectivamente. Cabe mencionar que para el caso de interés se ha omitido el eje coordenado  $Z_w$  dado que el robot móvil solo trabaja en los dos ejes coordenados  $X_w - Y_w$ .

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (11)$$

$$RP_\alpha = \pm 3S_\alpha \quad (12)$$

considerando:

$$\bar{l} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m l_i \quad (13)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (l_i - \bar{l})^2}{m-1}} \quad (14)$$

$$S_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_3^i - \hat{\phi})^2}{m-1}} \quad (15)$$

$$l_i = \sqrt{(x_3^i - \hat{x}) + (x_3^i - \hat{y})^2} \quad (16)$$

Donde  $x_1^i$ ,  $x_2^i$  y  $x_3^i$  representan el  $i$ -ésimo resultado de las  $m$  repeticiones para cada estado  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  respectivamente,  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  y  $\hat{\phi}$  representan el valor promedio de las  $m$  repeticiones del experimento.

Por consiguiente para obtener los parámetros de repetibilidad se ha considerado, bajo las mismas condiciones de experimentación, realizar un número de repeticiones de  $m = 30$  y como estados deseados a  $x_d = [0.5, 0.5, 0, 0, 0, 0]$ . Los resultados de las  $m$  repeticiones se muestran en la tabla 1.

El grado de repetibilidad calculado con base en los resultados de la tabla 1, son:  $RP_l = \pm 0.0011m$  y  $RP_{\alpha} = \pm 0.0136rad$  en posición y en orientación respectivamente, donde estos resultados verifican la fiabilidad del sistema de control para realizar una tarea en específico bajo las mismas condiciones de operación.

Tabla 1 Resultados en estado estacionario para  $m = 30$  repeticiones.

# Experimento \ GDL	$x_1^i$	$x_2^i$	$x_3^i$	# Experimento \ GDL	$x_1^i$	$x_2^i$	$x_3^i$
1	0.4963	0.4982	-0.0056	16	0.4955	0.4978	-0.0049
2	0.4961	0.4979	-0.0045	17	0.4958	0.4988	-0.0040
3	0.4962	0.4985	-0.0055	18	0.4956	0.4976	-0.0042
4	0.4955	0.4977	-0.0050	19	0.4954	0.4980	-0.0052
5	0.4960	0.4982	-0.0047	20	0.4952	0.4979	-0.0047
6	0.4960	0.4984	-0.0045	21	0.4956	0.4978	-0.0051
7	0.4957	0.4984	-0.0050	22	0.4958	0.4980	-0.0060
8	0.4960	0.4981	-0.0054	23	0.4960	0.4977	-0.0053
9	0.4952	0.4978	-0.0047	24	0.4960	0.4976	-0.0046
10	0.4959	0.4978	-0.0040	25	0.4964	0.4984	-0.0018
11	0.4953	0.4977	-0.0049	26	0.4954	0.4980	-0.0052
12	0.4957	0.4977	-0.0050	27	0.4960	0.4985	-0.0057
13	0.4957	0.4977	-0.0050	28	0.4954	0.4981	-0.0053
14	0.4955	0.4978	-0.0049	29	0.4958	0.4979	-0.0045
15	0.4958	0.4988	-0.0040	30	0.4959	0.4979	-0.0043

## Exactitud

La exactitud expresa la desviación entre la postura deseada y la media de  $m$  posturas obtenidas, cuando la postura final deseada se dirige en la misma dirección. La exactitud en postura se encuentra dividido exactitud en posición ( $AP_p$ ) y exactitud en orientación ( $AP_\alpha$ ), dadas por las ecuaciones 17 y 18

$$AP_p = \sqrt{(\hat{x}_e - \bar{x}_d)^2 + (\hat{y}_e - \bar{y}_d)^2} \quad (17)$$

$$AP_\alpha = (\hat{\phi}_e - \bar{\phi}_d) \quad (18)$$

Donde  $\hat{x}_e$ ,  $\hat{y}_e$  y  $\hat{\phi}_e$  representan el valor promedio en los estados  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  para las  $m$  repeticiones del experimento.

El registro de datos para el cálculo de la exactitud fue obtenido a partir de un sistema de faros activos basado en cámaras, localizado en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN). Este sistema de localización cuenta con 16 cámaras OptiTrack que operan en un espacio de trabajo útil de  $1.5 \times 1.5m$  y una PC con sistema operativo Windows 7 con procesador Core i7 a 3.5GHz y 32GB de memoria RAM. Este sistema obtiene la posición del robot móvil mediante la triangulación de tres marcadores retro-reflectantes que se colocan en la cara superior del robot. Cabe mencionar que este sistema presentó un margen de error  $M_e = 0.07m$ . Este margen de error se obtuvo mediante el siguiente experimento: se elaboró un cuadrado de  $1m$  por lado, donde en cada arista y en su centro geométrico se colocaron marcadores. Se registraron las posiciones cartesianas de las marcas a través del sistema de cámaras en donde el origen era el centro del cuadrado. Se observó que las distancias del centro del cuadrado a cada vértice, presentaba una variación entre  $0.04m$  a  $0.07m$  entre la posición real y la medida por el sistema de cámaras.

El experimento propuesto para obtener el parámetro de exactitud consiste en obtener los estados correspondientes a  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  y  $P_4$ . Hay que mencionar además, en el estándar ISO-9283 se establece que el número de muestras mínimo es de  $m = 30$ . Sin embargo, debido al proceso de calibración necesarios

para el sistema de cámaras y el tiempo que conlleva su ejecución, se realizó el registro de datos correspondientes a dos experimentos, resultando en  $m = 2$ . En la tabla 2 se muestran los resultados de exactitud en posición y orientación.

Evaluando los resultados anteriores que se obtuvieron del sistema de cámaras y con base en las ecuaciones 17 y 18 se determinó que el sistema de posicionamiento del robot móvil presenta una exactitud de  $AP_p = 0.0779m$  y  $AP_a = 0.1137rad$  en posición y orientación respectivamente.

Tabla 2 Resultados de cámaras en estado estacionario.

Numero de Corrida	Coordenada GDL (m)	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
1	$x_1$	0.4176	-0.5131	-0.5112	0.4436
	$x_2$	0.4729	0.4446	-0.5300	-0.5485
	$x_3$	0.0094	1.4810	3.0381	4.5797
2	$x_1$	0.4176	-0.5229	-0.5132	0.4436
	$x_2$	0.4837	0.4319	-0.5418	-0.5590
	$x_3$	0.0193	1.4740	3.06921	4.6176

En la figura 7 se muestra en superposición el desplazamiento realizado por el robot móvil en los dos experimentos realizados, las posiciones deseadas, el radio de exactitud  $AP_p = 0.0779m$ , y el radio del margen de error  $M_e = 0.07m$  de las cámaras. Haciendo referencia a la figura 5a se observa que los resultados registrados por las cámaras y los resultados obtenidos por el sistema de localización por odometría, se comportan de forma similar y además las posiciones alcanzadas se encuentran dentro del radio  $M_e$ , presentando por lo tanto un buen desempeño.

Para mostrar el funcionamiento físico del robot, se ha realizado la grabación del experimento realizado en el apartado 3, extrayendo las imágenes (figura 8) en las que el robot se encontraba en estado estacionario en cada coordenada deseada y de inicio. En es posible observar que el robot móvil exhibe un mayor grado de error en las coordenadas alcanzadas 1 y 3, teniendo un error máximo aproximado de  $0.04$  m y  $0.02$  m en  $X_w$  y  $Y_w$  respectivamente, donde este parámetro fue determinado al superponer un mallado sobre las imágenes obtenidas.

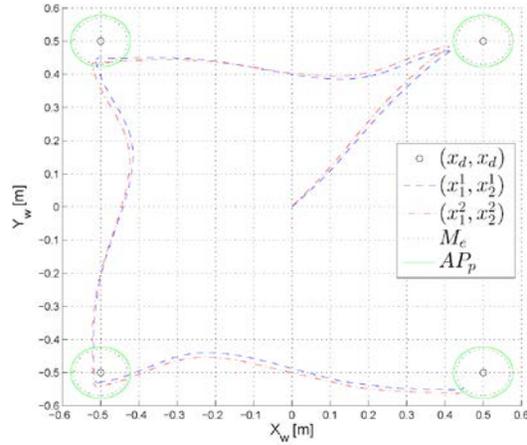


Figura 7 Posición deseada y comportamiento del robot móvil en sistema coordenado.

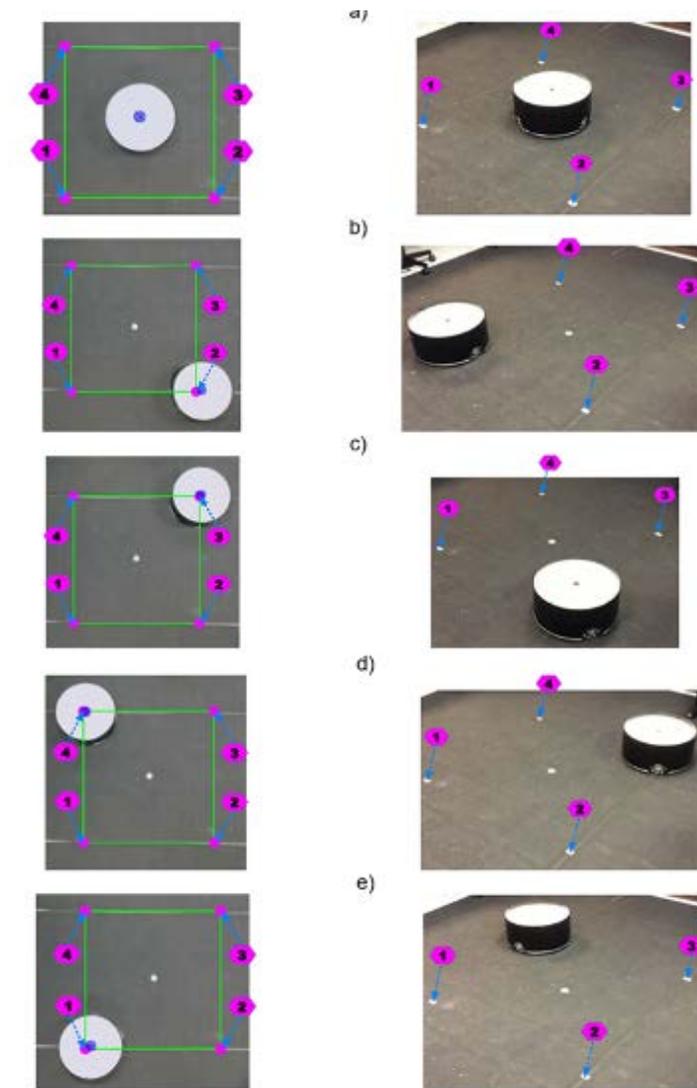


Figura 8 Capturas del posicionamiento del robot móvil 3.0.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se presentó un robot móvil 3.0 y la evaluación de su sistema de control y de posicionamiento. Esta evaluación fue realizada al determinar el grado de repetibilidad y exactitud en posicionamiento y en orientación con base en el estándar ISO-9283.

Considerando el sistema de odometría como sistema de medición, la repetibilidad que presenta el robot móvil después de realizar 30 veces el experimento fue de  $RP_t = \pm 0.0011$  m y  $RP_o = \pm 0.0136$  rad en posición y en orientación respectivamente. Estos resultados verifican que el sistema de control presenta un buen grado de fiabilidad para realizar una tarea en específico bajo las mismas condiciones de operación.

Al comparar la posición absoluta del robot móvil obtenida a través de un sistema de faros activos basado en cámaras con la posición absoluta del sistema de odometría presente en el trabajo, se obtuvo una exactitud de  $AP_p = 0.0779$  m y  $AP_o = 0.1137$  rad en posición y orientación respectivamente, a pesar de presentar un margen de error  $M_e = 0.07$  m en el proceso de calibración del sistema de cámaras.

Considerando la intersección del radio  $M_e$  con el radio de la exactitud  $AP_p$ , se puede observar que existe una diferencia de  $\pm 0.0079$  m, lo que indica que el sistema de posicionamiento absoluto con base en odometría presenta un buen grado de fiabilidad en la localización del robot móvil.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Cox, I., Blanche-an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle. s.l.:IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991.
- [2] Guerrero-Castellanos, J. F., Villarreal-Cervantes, M. G., Sánchez Santana, J. P. & Ramírez-Martínez, Seguimiento de Trayectorias de un Robot Móvil 3.0 mediante control acotado. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, pp. 426-434, 2014.

- [3] Dierks, T. & Jagannathan, S., Control of Nonholonomic Mobile Robot Formations: Backstepping Kinematics into Dynamics. Singapore, Singapore: IEEE International Conference on Control Applications, 2007.
- [4] Fu, G. y otros, Precise Localization of Mobile Robots via Odometry and Wireless Sensor Network. s.l.:International Journal Advance Robotics Systems, 2013.
- [5] Huang, J. y otros, Robot Position Identification by Actively Sound Beacons. Instruments and Measurement Technology Conference, pp. 1908-1912, 2006.
- [6] Siegwart, R. & Nourbakhsh, I. R., Introduction to Autonomous Mobile Robots. s.l.:Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [7] Sin, S., Kwon, D. & Myung, J., New Tag Arrangement Pattern for a Differential Driving Mobile Robot Based on RFID System. International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1228 -1233, 2007.
- [8] Standarization, I. O. o., Manipulating Industrial Robots-Performance Criteria and Related Test Methods. s.l.:ISO-9283, 1991.
- [9] Villarreal-Cervantes, M. G., Notas de Lectura: Modelo cinemático y dinámico del robot móvil 3.0. s.l.:s.n, 2015.
- [10] Villarreal-Cervantes, M. G. & Pantoja-García, J. S., Análisis comparativo entre un control heurístico y un PID para un sistema mecatrónico. s.l.:3th International Supercomputing Conference, 2012.
- [11] Xu, H. & Collins, J. J., Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot by Neural Networks. s.l.:International Conference on Machine Learning and Applications, 2009.