

MEJORAS EN LA LOCALIZACIÓN ODOMÉTRICA DE UN ROBOT DIFERENCIAL MEDIANTE LA CORRECCIÓN DE ERRORES SISTEMÁTICOS

Improving odometry accuracy in a differential-drive robot by correcting systematic errors

RESUMEN

A pesar de los inconvenientes de la localización odométrica, la misma es ampliamente usada en sistema de navegación de robots móviles. La exactitud de los parámetros del modelo cinemático mejora los resultados en la localización y contribuye a reducir los costos operacionales. Este artículo propone una metodología sencilla que no requiere de instrumentos especiales para calibrar los parámetros de la cinemática de un robot tipo diferencial. El sistema de localización así calibrado, mostró buena capacidad para estimar la posición real del móvil, con errores por debajo del 10 % en tramos hasta de 40 metros incluyendo giros de 90 grados.

PALABRAS CLAVES: Localización odométrica, Robot diferencial, Sensores de odometría.

ABSTRACT

In spite of disadvantages of the odometric localization, it is widely used in mobile robots positioning system. Accuracy on the parameters of the kinematics model improves the localization results and contributes to reduce the operational costs. This paper proposes a simple method for differential-drive robot odometry calibration, where no special instruments are required. The localization system thus calibrated, showed a good capacity to estimate actual robot position, with errors below 10 % in path 40 meters long including 90-degrees turns on the spot.

KEYWORDS: *Differential-Drive Robot, Odometric Localization, Odometric Sensors.*

1. INTRODUCCIÓN

El proceso más básico para la localización de un robot móvil se basa en el modelo cinemático del sistema de propulsión. La posición de un robot tipo diferencial puede ser estimada a partir de las ecuaciones geométricas que surgen de la relación entre los componentes del sistema de propulsión y de la información de los codificadores rotativos que usualmente llevan acoplados a sus ruedas [1]. Este procedimiento es conocido como *odometric dead-reckoning*, o simplemente odometría. Dado que la odometría es una parte importante del sistema de localización de un robot móvil, mejorar la exactitud y precisión de los parámetros que modelan la misma conduce a una importante mejora del sistema general de navegación. Además, la buena calibración de la odometría reduce los costos operacionales ya que se requieren menos actualizaciones de la posición absoluta del robot.

Un método de calibración simple consiste en la medición directa de los parámetros del modelo cinemático del móvil. Este método consiste en medir los parámetros cinemáticos del robot (diámetros ruedas o distancias entre ella) de manera directa; o también en determinar las relaciones de conversión cinemática (por ejemplo mts/pulsos, etc) a través de ensayos especiales. *Goel et*

DANILO NAVARRO.

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Departamento de Ing. Eléctrica
Universidad de Oriente. Venezuela.
dnavarro@cantv.net

GINES BENET GILABERT.

Ingeniero de Sistemas, Ph.D.
Departamento Informática de
Sistemas y Computadores.
Universidad Politécnica de Valencia
gbenet@disca.upv.es

LUIS HERNANDO RIOS.

Ingeniero Electrónico, M.Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
lhgonza@utp.edu.co

MAXIMILIANO BUENO L.

Ingeniero Electricista
Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
max@ohm.utp.edu.co

al[2], valiéndose de un tacómetro de precisión, midió la velocidad real en las ruedas motrices para determinar la relación efectiva entre la velocidad indicada por los codificadores y la velocidad real en las ruedas. *Borenstein* y *Feng* han desarrollado una técnica de calibración que llamaron UMBmark (*University of Michigan Benchmark*) que es una herramienta para la calibración de los errores sistemáticos que típicamente afectan a las plataformas móviles diferenciales [3]. Este método es usado con mucha frecuencia en la determinación de los errores en los parámetros cinemáticos de un robot diferencial, pero al mismo tiempo es relativamente difícil de realizar y es muy sensitivo a los errores no sistemáticos. Otra desventaja que presenta el UMBmark es que requiere de un espacio de experimentación relativamente grande en comparación con los entornos interiores donde se realizan, y esto no siempre es posible. Por último, el método no es adecuado para identificación de los parámetros cinemáticos del robot, ya que el algoritmo requiere que se le suministre el valor inicial de los parámetros buscados. *Abbas et al* [4] resuelve parte de esta problemática proponiendo una trayectoria de calibración circular. Sin embargo los resultados son mostrados sólo mediante simulación del sistema.

En este artículo se desarrollan las ecuaciones y la metodología necesaria para la identificación y calibración de los parámetros del modelo de la cinemática de un robot diferencial. El método presenta la ventaja de ser muy simple de realizar e insensitivo a los errores no sistemáticos ya que utiliza un mecanismo de filtrado estadístico para rechazar los valores atípicos. También presenta la ventaja de no necesitar sensores especializados ni grandes espacios experimentales. Adicionalmente, este método también desacopla los efectos de la incertidumbre en el diámetro de las ruedas, del efecto de la incertidumbre en la base de giro, cuando se realiza la determinación de la sensibilidad odométrica.

2. MODELADO DE LA CINEMÁTICA EN ROBOTS DIFERENCIALES

Típicamente una plataforma móvil de tracción diferencial cuenta con dos pares de ruedas: dos ruedas de tracción que usualmente tienen acoplados sendos codificadores rotativos, dos ruedecillas de estabilización que mantienen el balance axial del vehículo. La traslación y la rotación de este tipo de plataformas diferenciales están determinadas por el movimiento independiente de cada uno de las ruedas de tracción.

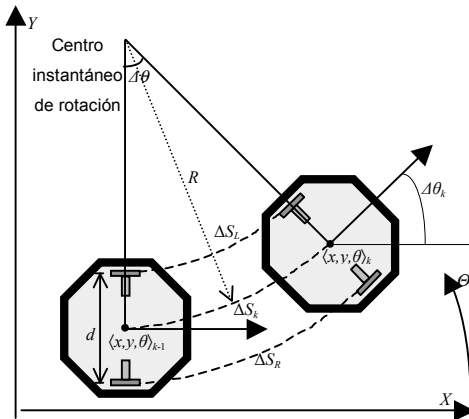


Figura 1. Desplazamiento relativo entre instantes de muestreo. ΔS_k es el arco recorrido por el centro del robot y $\Delta \theta_k$ es el giro diferencial en el intervalo $[k-1, k]$. d es la distancia entre los puntos de apoyo de las ruedas motrices.

De la figura 1 se pueden obtener las siguientes relaciones,

$$\Delta S_k = (\Delta S_R + \Delta S_L) / 2 \tag{1}$$

$$\Delta \theta_k = (\Delta S_R - \Delta S_L) / d \tag{2}$$

Aquí ΔS_R y ΔS_L son los arcos recorridos por la rueda derecha e izquierda respectivamente. Estos arcos pueden ser calculados a partir de la cadena cinemática ruedas-sensor según como se muestra en la figura 2.

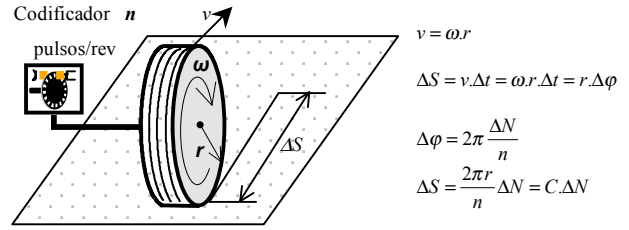


Figura 2. Esquema del sistema de medición de desplazamiento lineal mediante codificadores rotativos. ΔN corresponde a la cantidad de pulsos que genera el codificador en el intervalo ΔS . $C = 2\pi r/n$ se conoce como la constante de sensibilidad odométrica, y se expresa en unidades de longitud por pulso.

Si se mantiene una frecuencia de muestreo constante y elevado sobre el sistema de odometría de un móvil diferencial, se puede estimar la posición y orientación del mismo mediante las siguientes ecuaciones en diferencia

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \Delta S_k \cos(\theta_{k-1} + \Delta \theta_k / 2) \\ y_k = y_{k-1} + \Delta S_k \sin(\theta_{k-1} + \Delta \theta_k / 2) \\ \theta_k = \theta_{k-1} + \Delta \theta_k \end{cases} \tag{3}$$

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINEMÁTICOS DE UN ROBOT DIFERENCIAL

La odometría es una parte importante del sistema de localización de un robot móvil. Mejorar la exactitud y precisión de los parámetros que la modelan conduce a una importante mejora del sistema general de navegación. *Borenstein* y *Feng* determinaron que las fuentes dominantes de error en los sistemas de localización odométrica en robot diferenciales son la diferencia entre los diámetros de las ruedas y la incertidumbre con respecto a la base de giro real[5]. A continuación se desarrolla un método general para determinar estos parámetros.

3.1 DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD ODOMÉTRICA

La sensibilidad odométrica corresponde a un factor de escala $C = 2\pi r/n$, donde r es el radio de la rueda de odometría y n es la resolución del codificador acoplado a ella. No obstante, en forma práctica esta sensibilidad es igual a la relación desplazamiento/pulsos de cada una de las ruedas. De aquí que una manera simplista de determinar esta relación sea programar el robot para que se mueva sobre un trayecto rectilíneo corto, medir la distancia recorrida por cada rueda al tiempo que se registra la cantidad de pulsos generados por el codificador correspondiente, y entonces determinar el cociente (mts/pulsos). Sin embargo, esta sensibilidad en general no es adecuada para el seguimiento fiable de la posición de un robot, y por lo tanto es usual determinar la sensibilidad real o efectiva mediante métodos

experimentales mas exhaustivos [6,3,7]. En este artículo proponemos un modelo que trata de recoger las imperfecciones del hardware así como también los efectos aleatorios del entorno.

$$C^{efectiva} = (1 + \alpha_c)C^{nominal} + \epsilon_c \quad (4)$$

α_c es el factor de corrección que recoge las imperfecciones del hardware y ϵ_c es el termino que modela los efectos aleatorios debido a los derrapes, tipo de suelo, etc. Si se asume que los efectos aleatorios se distribuyen de manera normal con media cero y varianza σ_c^2 , entonces la sensibilidad odométrica también se distribuirá de manera normal según,

$$C^{efectiva} \sim N(\bar{C}, \sigma_c^2) \quad (5)$$

donde \bar{C} es la media y σ_c^2 la varianza.

Para determinar la sensibilidad odométrica la estrategia general consiste en excitar los parámetros odométricos del robot a través de un trayecto rectilíneo a fin de minimizar el efecto que tiene la base de giro en el estimado de la posición del robot.

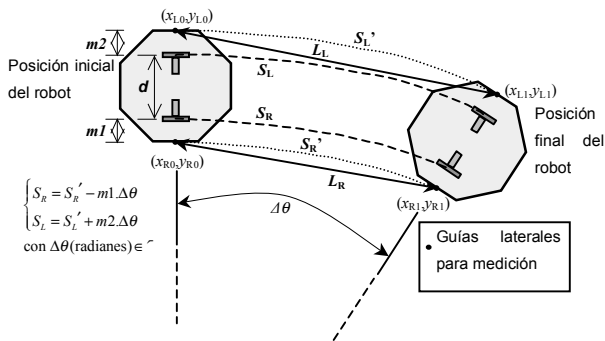


Figura 3. Esquema del trayecto rectilíneo para la determinación de la sensibilidad odométrica en un robot diferencial. Se muestra el efecto de curvatura causado por la posible diferencia entre los diámetros en las ruedas de tracción.

A partir de la figura 3 se pueden deducir las siguientes relaciones,

$$\begin{cases} S_L = \frac{L_L}{\sin c(\Delta\theta/2)} + m_2\Delta\theta \\ S_R = \frac{L_R}{\sin c(\Delta\theta/2)} - m_1\Delta\theta \end{cases} \quad (6)$$

en estas ecuaciones, $\sin c(\cdot)$ es la función seno cardinal,

$$\sin c(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ \frac{\sin(x)}{x} & \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

- a) L_R y L_L son la distancia en línea recta que recorre el punto de medición derecho e izquierdo respectivamente.
- b) S_R y S_L son los arcos recorridos por los puntos de apoyo de las ruedas derecha e izquierda respectivamente.
- c) m_1 y m_2 corresponden a la distancia que existe entre el punto de apoyo de la rueda derecha e izquierda respectivamente y el punto de medición de su correspondiente lado.
- d) $\Delta\theta$ es el ángulo que el robot gira debido a velocidades desiguales en ambas ruedas, o a que los diámetros de las mismas son diferentes entre si.

Como se aprecia, la expresión para el arco recorrido tiene una importante dependencia del ángulo de rotación del robot; y ya que este ángulo no es muy fácil de medir, es conveniente que el desplazamiento del robot sea perfectamente rectilíneo, es decir que $\Delta\theta \rightarrow 0$. Sin embargo, cuando no es posible lograr una trayectoria suficientemente rectilínea como para asumir $\Delta\theta \approx 0$, si se cuenta con un escenario susceptible de ser normalizado o si se puede fijar un marco de referencia (p.e. dos paredes es escuadra), se pueden determinar las coordenadas absolutas de los puntos de medición del robot. Posteriormente, siempre que durante el trayecto la velocidad en las ruedas del móvil se haya mantenido constantes, se puede determinar el ángulo de giro con la siguiente ecuación,

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \left[\frac{(x_{L1} - x_{R1})(y_{R0} - y_{L0}) + (y_{L1} - y_{R1})(x_{L0} - x_{R0})}{(d + m_1 + m_2)^2} \right] \quad (8)$$

Aquí d es la distancia nominal entre los puntos de apoyo de las ruedas de odometría, (x_{R0}, y_{R0}) y (x_{L0}, y_{L0}) son las coordenadas de los puntos de medición derecho e izquierdo respectivamente, medidas al inicio del movimiento. (x_{R1}, y_{R1}) y (x_{L1}, y_{L1}) son las coordenadas de los puntos de medición derecho e izquierdo respectivamente, medidas al finalizar el movimiento. Finalmente, la sensibilidad odométrica se obtiene mediante el cociente,

$$\begin{cases} C_L = \frac{S_L}{\Delta N_L} \\ C_R = \frac{S_R}{\Delta N_R} \end{cases} \quad \text{unidades de logitud/pulso} \quad (9)$$

Donde ΔN_R y ΔN_L corresponden al número de pulsos registrados por los codificadores rotativos a través de los trayectos S_R y S_L respectivamente.

3.2 DETERMINACIÓN DE LA BASE DE GIRO

En un robot diferencial, la distancia entre los dos puntos de contacto de las ruedas de odometría con el plano de desplazamiento, se conoce como base de giro B . Las ecuaciones cinemáticas para la estimación de la posición mediante odometría se basan en el caso ideal donde las ruedas se apoyan solo en su punto de tangencia con el mencionado plano. Sin embargo debido a que normalmente lo que las ruedas ofrecen es un área de contacto, entonces la distancia entre los puntos de apoyo suele variar ligeramente dependiendo de factores como el desbalance dinámico a causa de movimientos giratorios, a la deformación elástica que sufren las ruedas por el peso muerto sobre el robot, etc. De aquí que sea necesario determinar el valor práctico de esta distancia. El carácter diverso de los factores que afectan la base de giro, sugieren que la misma puede modelarse como

$$B^{\text{efectiva}} = (1 + \alpha_b)d + \varepsilon_b \quad (10)$$

B es la distancia entre los puntos de apoyo de la rueda derecha e izquierda, α_b es un factor de corrección debido a imperfecciones del hardware, y ε_b es el componente aleatorio debido sobre todo al desbalance de carga y a la deformación elástica. Si se asume que los efectos aleatorios se distribuyen de manera normal con media cero y varianza σ_b^2 , entonces la sensibilidad odométrica también se distribuirá de manera normal según,

$$B^{\text{efectiva}} \sim N(\bar{B}, \sigma_b^2) \quad (11)$$

donde \bar{B} es la media y σ_b^2 la varianza.

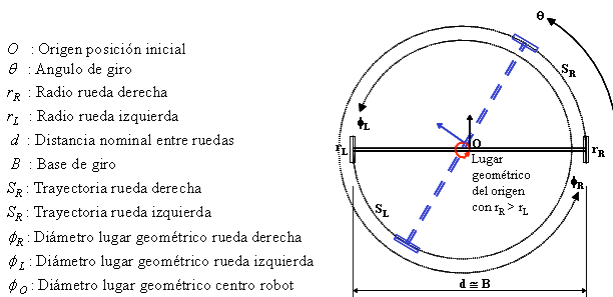


Figura 4. Lugar geométrico que describen los puntos de apoyo de la base de giro en un móvil diferencial cuando gira a velocidad en ruedas constante.

Distintos a otros métodos donde se proponen trayectorias de excitación en la cual está acoplado el efecto de la incertidumbre en la base de giro y la incertidumbre en el diámetro de las ruedas [5], aquí se propone un método que minimiza este efecto ya que se trata de una trayectoria de excitación estrictamente angular, la cual se muestra en la figura 4. En la mencionada figura se muestra el lugar geométrico que describen los puntos de apoyo y el centro del robot cuando el móvil se hace girar sobre su mismo eje a velocidad constante y con

diámetros de ruedas distintos entre si. Un primer detalle que se pone de manifiesto es que a pesar de que el centro robot hace un giro excéntrico, los puntos de apoyo mantienen la misma trayectoria consistentemente ciclo tras ciclo. Esto permite afirmar que al término de un giro de 360° , el centro robot y los puntos de apoyo coincidirán con el punto del cual partieron originalmente. Esto es especialmente conveniente porque permitirá entonces determinar las coordenadas $\langle x, y \rangle$ de los puntos de medición dentro de un marco de referencia local. De la figura 4 se puede deducir que la base de giro es igual a,

$$B = (\phi_R + \phi_L) / 2 \quad (12)$$

El procedimiento para determinar ϕ_R y ϕ_L se inicia programando el robot para que gire aproximadamente 360° sobre su mismo eje, al tiempo que se registran los pulsos (N_R, N_L) proveniente de los codificadores derecho e izquierdo respectivamente. Entonces, conociendo el ángulo de giro total θ , se determinan los diámetros derecho e izquierdo de acuerdo a lo siguiente:

$$\begin{cases} \phi_R = 2 \frac{C_R \Delta N_R}{\theta} \\ \phi_L = 2 \frac{C_L \Delta N_L}{\theta} \end{cases} \quad (13)$$

Donde C_R y C_L corresponden a la sensibilidad odométrica ya determinada en (9), ΔN_R y ΔN_L corresponden al número de pulsos registrados por los codificadores rotativos a través de los trayectos S_R y S_L respectivamente, y θ es el giro total que se determina mediante la ecuación,

$$\theta = 2\pi + \sin^{-1} \left[\frac{(x_{L1} - x_{R1})(y_{R0} - y_{L0}) + (y_{L1} - y_{R1})(x_{L0} - x_{R0})}{(d + m_1 + m_2)^2} \right] \quad (14)$$

Aquí d es la distancia nominal entre los puntos de apoyo de las ruedas de odometría, $\langle x_{R0}, y_{R0} \rangle$ y $\langle x_{L0}, y_{L0} \rangle$ son las coordenadas de los puntos de medición derecho e izquierdo respectivamente, medidas al inicio del movimiento. $\langle x_{R1}, y_{R1} \rangle$ y $\langle x_{L1}, y_{L1} \rangle$ son las coordenadas de los puntos de medición derecho e izquierdo respectivamente, medidas al finalizar el movimiento. Igualmente m_1 y m_2 corresponden a la distancia que existe entre el punto de apoyo de la rueda derecha e izquierda respectivamente y el punto de medición de su correspondiente lado.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los experimentos se han conducidos a través de un prototipo de robot diferencial llamado YAIR (Yet

Another intelligent Robot). Este prototipo ha sido desarrollado como banco de pruebas para la investigación de varios problemas relacionados con los sistemas distribuidos de tiempo real [8]. El bloque motor de este robot esta formado por un par de motores DC controlados por sendos integrados HCTL1100 de Hewlett Packard, y por una tarjeta, basada en microprocesadores, que sirve como interfase de comando y medición con el procesador principal. Las ruedas motrices del YAIR tienen un diámetro nominal de 160 mm y una separación entre ellas de 363 mm. Igualmente, estas ruedas motrices cuentan con un codificador rotativo acoplado al eje de cada motor, con el cual se suministra al sistema la información odométrica necesaria para tareas de control de cada uno de los motores. Al mismo tiempo, esta información odométrica se aprovecha para el sistema básico de estimación del estado del robot. Además de estos sensores, YAIR también cuenta con otros sistemas sensoriales conectados entre si mediante un bus CAN (*Controller Area Network*).

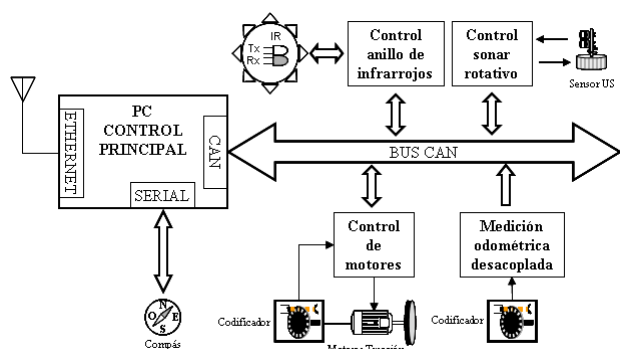


Figura 5. Arquitectura multi-sensorial del robot YAIR.

Para validar los procedimientos aquí descritos, se realizaron pruebas experimentales en un escenario interior cuyo plano de desplazamiento fue adecuadamente demarcado para constituir así un plano cartesiano donde el robot pudiera moverse. De esta forma, para cualquier posición que adoptará el robot dentro de este plano de trabajo, se pudo obtener las coordenadas de los puntos de medición situados a ambos lados del eje odométrico-motor del robot YAIR. Para la medición de la sensibilidad odométrica, se programaron trayectos rectilíneos de 500 milímetros, los cuales fueron ejecutados indistintamente en la dirección de avance o en la dirección de retroceso. Para la determinación de la base de giro se programó el robot para que realizara giros de 360° sobre su mismo eje, ejecutando alternativamente giros en el sentido de las manecillas del reloj y giros en sentido contrario a las mismas.

Como experimento de contraste se ejecutó la técnica de calibración propuesta por Borenstein y Feng conocida como UMBmark. Este experimento requiere que el robot repita varias veces un trayecto en forma de cuadrilátero cuyos lados son de longitud L, y que al mismo tiempo estime su posición final usando para ello los parámetros

cinemáticos nominales y la información provista por los sensores de odometría. En este caso, se programó al robot para que ejecutara trayectos cuadrados de 4 metros por lado.

Para validar los resultados se programó al YAIR para que siguiera un trayecto de aproximadamente 40 metros de longitud que incluía 8 giros sobre su mismo eje de aproximadamente 90 grados cada uno. Cada 0.5 metros se midió la posición real del robot, así como también se registró la posición estimada mediante los parámetros calibrados con el método directo aquí propuesto, y con el método UMBmark.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 6 muestra la distribución de los datos de sensibilidad odométrica de la rueda izquierda y derecha del robot YAIR. Asimismo, los principales estadísticos correspondientes a estos datos se muestran en la tabla 1.

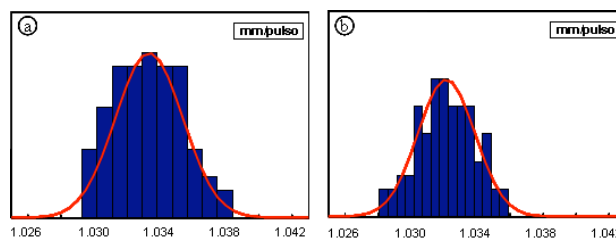


Figura 6. Histogramas y distribución de probabilidad aproximada de los datos de sensibilidad odométrica resultantes en los experimentos con el robot YAIR. a) rueda izquierda, b) rueda derecha.

	Rueda Izquierda	Rueda derecha
Frecuencia	79	82
Media	1.0334	1.0322
Varianza	4.13e-6	2.97e-6
Desviación típica	2.03e-3	1.72e-3
Mínimo	1.0293	1.0281
Máximo	1.0384	1.0359
Rango	0.0091	0.0078
Asimetría tipificada	0.2420	-0.1426
Curtosis tipificada	-0.8991	-0.8436

Tabla 1. Resumen estadístico de la sensibilidad odométrica del robot YAIR.

De la figura 6 y la tabla 1 se aprecia que el valor más probable para la sensibilidad odométrica de las ruedas izquierda y derecha está alrededor de 1.0334 y 1.0322 mm/pulso, respectivamente. De aquí que estos sean los valores que se fijan como la sensibilidad odométrica efectiva para cada una de las ruedas. También, a partir de los valores de la asimetría y curtosis tipificada mostrada en la tabla 1, se puede concluir que los datos de sensibilidad se distribuyen de manera normal con las varianzas que se muestran en la misma tabla.

La tabla 2 muestra la comparación, con los valores nominales, de los resultados obtenidos mediante el método de calibración directa aquí propuesto y los obtenidos mediante el método del UMBmark.

YAIR	Valores nominales	Método directo		UMBmark	
		Result.	σ	Result.	σ
C_R mm/pulso	1	1.032	0.004	0.9990	----
C_L mm/pulso	1	1.033	0.003	1.0010	----
B mm	363	363	1	360	----

Tabla 2. Comparación de resultados para los parámetros cinemáticos de YAIR obtenidos por el método directo y por el UMBmark.

Los resultados mostrados en la figura 7 evidencian una notable mejora de la exactitud del estimado de la posición del sistema calibrado mediante el método directo respecto al sistema calibrado mediante el método UMBmark. Igualmente también se muestra la capacidad del robot de navegar en interiores manteniendo un buen seguimiento de su posición real.

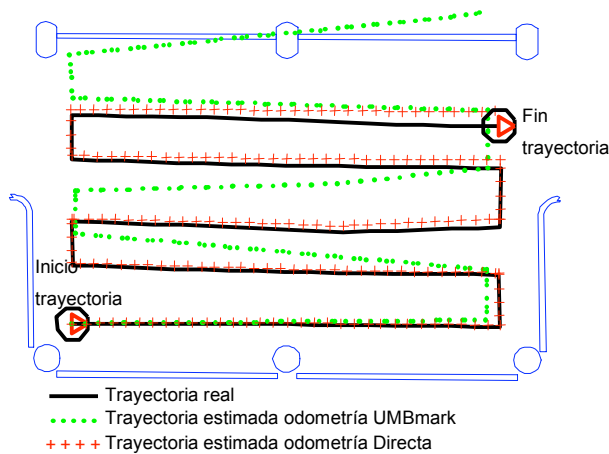


Figura 7. YAIR: comparación de la localización odométrica estimada con dos conjuntos de parámetros distintos.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha presentado un método de identificación y calibración de los parámetros de la cinemática directa de un robot diferencial, que no requiere de amplios espacios experimentales ni de instrumentos especializados para la aplicación del mismo. En este caso sólo se requiere que la salida básica de los codificadores rotativos, normalmente acoplados a las ruedas motrices, puedan ser registrados individualmente.

Los movimientos rectilíneos cortos y los giros sobre su mismo eje son trayectorias muy adecuadas para la calibración de un robot diferencial, ya que en el proceso de calibración se desacopla la influencia de la incertidumbre en la base de giro cuando se trata de calibrar la sensibilidad odométrica, y se desacopla la influencia de la incertidumbre en los diámetros de las

ruedas cuando se trata de calibrar la base de giro. Igualmente, los trayectos cortos favorecen el uso de velocidades de bajas a moderadas, lo que a su vez reduce la aparición de valores atípicos producidos por el derrapes de las ruedas motrices.

Los valores de sensibilidad muestran distribuciones gaussianas, lo que a futuro es muy conveniente al momento de representar la incertidumbre en la estimación de la posición de un robot móvil.

A futuro se aplicará el método de calibración para incluir situaciones de funcionamiento más reales como por ejemplo trayectos con desplazamientos y giros aleatorios. También, con la instrumentación adecuada, se aplicará este método para que el robot lo realice de forma autónoma.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Klarer, "Simple 2d navigation for wheeled vehicles," tech. rep., Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM., 1998.
- [2] P. Goel, S. Roumeliotis, and G. Sukhatme, "Robust localization using relative and absolute position estimates," in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. vol. 2, pp. 1134-1140, 17-21 Oct. 1999.
- [3] J. Borenstein and L. Feng, "Umbmark: A benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots," in Proceedings of the 1995 SPIE Conference on Mobile Robots, (Philadelphia), October 1995.
- [4] T. Abbas, M. Arif, and W. Ahmed, "Measurement and correction of systematic odometry errors caused by kinematics imperfections in mobile robots," in SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference, pp. 2073-2078, 18-21 Oct. 2006.
- [5] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots," IEEE Transactions on Robotic and Automation, vol. 12, pp. 869-880, 1996.
- [6] G. Antonelli and S. Chiaverini, "Linear estimation of the odometric parameters for differential-drive mobile robots," in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 3, pp. 3287-3292, Oct. 2006.
- [7] A. Martinelli, "The accuracy on the parameter estimation of an odometry system of a mobile robot," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 2, pp. 1378-1383, 11-15 May 2002.
- [8] F. Blanes, Percepción y representación del entorno en robótica móvil. Ph.D thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. España, 2000.