

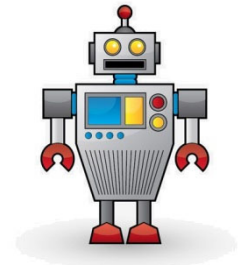


ECCI
Escuela de Ciencias de la
Computación e Informática

Odometría

CI-2657 Robótica

Prof. Kryscia Ramírez Benavides





Introducción

- 🤖 Es el estudio de la estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación.
- 🤖 Para realizar esta estimación se usa información sobre la rotación de las ruedas para estimar cambios en la posición a lo largo del tiempo.
- 🤖 Este término también se usa a veces para referirse a la distancia que ha recorrido uno de estos vehículos.
- 🤖 La palabra "odometría" se compone por las palabras griegas *hodos* ("viajar", "trayecto") y *metron* ("medida").



Odometría en Robótica

- 🤖 Los robots móviles usan la odometría para estimar (y no determinar) su posición relativa a su localización inicial.
- 🤖 La idea fundamental es la integración de información incremental del movimiento a lo largo del tiempo.
- 🤖 Basado en la suposición de que las revoluciones de las ruedas se puede traducir en desplazamiento lineal con relación al suelo.



Odometría en Robótica (cont.)

- 🤖 Proporciona una buena precisión a corto plazo, de bajo costo, permite altas velocidades de muestreo.
- 🤖 Sin embargo, esto también conduce a la acumulación de errores.
- 🤖 A pesar de estas limitaciones, es una parte importante del sistema de navegación de un robot, y que debe usarse con medidas de posicionamiento absolutas para proporcionar una estimación de la posición más fiable.



Odometría en Robótica (cont.)

- 🤖 Las posiciones que se dan respecto a las coordenadas del mundo, son a veces llamadas posiciones absolutas.
- 🤖 Pues bien, las posiciones estimadas a partir de la odometría no tienen nada que ver con las coordenadas del mundo, ya que son relativas al punto de inicio.



Odometría en Robótica (cont.)

- 🤖 Se define como punto de inicio aquel punto en el que se comienza a calcular la posición mediante odometría.
 - 🤖 O sea, aquel punto en el que encendemos el robot y empieza a correr el programa que estima la posición.
- 🤖 Este punto de inicio puede estar en cualquier punto de nuestro entorno y no siempre debe coincidir con un punto conocido.



Importancia y Usos

- 🤖 Fusionado con las medidas de posición para proporcionar una mejor estimación de la posición.
- 🤖 Mayor precisión puede dar como resultado menores actualizaciones de posiciones absolutas.
- 🤖 En algunos casos, cuando no hay referencias externas la odometría disponible es la única información de navegación disponible.
- 🤖 Muchos algoritmos de mapeo y de señal de correspondencia suponen que el robot puede mantener su posición lo suficiente como para permitir buscar puntos de referencia en una región limitada.



Encoders y Cinemática Diferencial

- 🤖 Los *encoders* son sensores que miden las revoluciones de un eje.
 - 🤖 Estos sensores son propioceptivos, ya que nos dan información sobre el estado interno del robot.
 - 🤖 Se utilizan para estimar la posición de un robot móvil.
- 🤖 Los *encoders*, como sensores que son, pueden estar basados en distintas tecnologías, y miden las revoluciones de un eje.
 - 🤖 Es decir, un *encoder* dice cuantas **vuelatas** ha dado un eje en un intervalo de tiempo dado.
 - 🤖 En un robot móvil, los *encoders* se suelen situar en los ejes de las ruedas, en cada uno de los grados de libertad de movimiento que pueda tener cada una de esas ruedas.

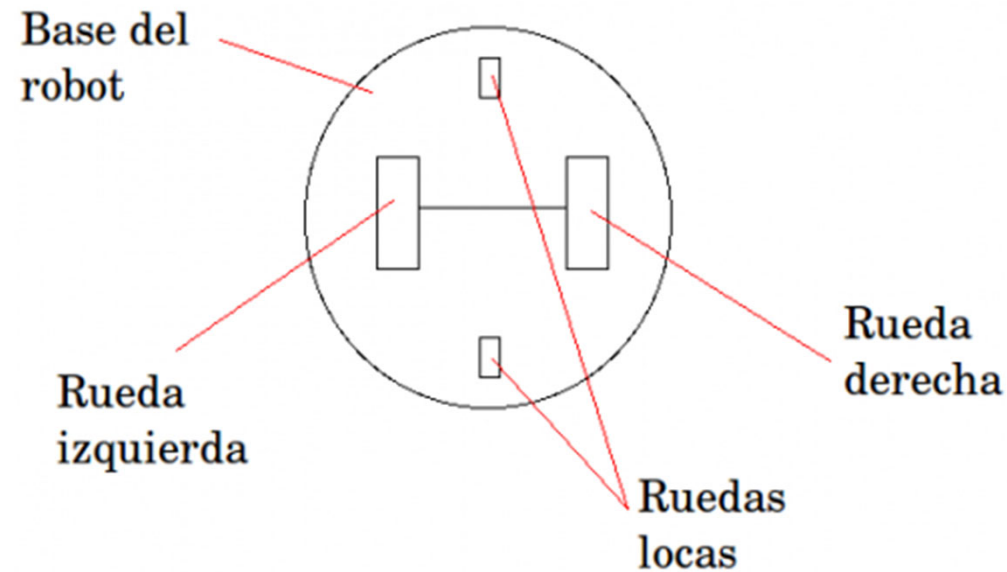


Encoders y Cinemática Diferencial (cont.)

- 🤖 A la configuración de ruedas y motores de un robot móvil se le denomina **cinemática** del robot.
 - 🤖 Se verá la más simple de todas: la **cinemática diferencial**.
- 🤖 Un robot móvil de cinemática diferencial es aquel que cuenta con dos ruedas motrices unidas por un eje.
 - 🤖 Cada una de estas ruedas tiene su propio motor que la hace girar en el plano perpendicular al eje que une ambas ruedas.

Encoders y Cinemática Diferencial (cont.)

- 🤖 Robot móvil con base circular y una cinemática diferencial.



Encoders y Cinemática Diferencial (cont.)

- 🤖 Hay dos ruedas (rueda izquierda y rueda derecha) unidas por un eje.
 - 🦾 Estas son las ruedas motrices que harán que el robot se mueva.
 - 🦾 Cada una de estas ruedas tiene su propio motor y un *encoder* que mide las revoluciones del eje.
- 🤖 Estas ruedas sólo giran en el plano perpendicular al eje que une a ambas ruedas. O sea, cada rueda sólo puede ir hacia adelante o hacia atrás.
- 🤖 El robot puede rotar haciendo que una rueda gire hacia adelante y la otra hacia atrás con la misma velocidad.
 - 🦾 Así, si la rueda derecha gira hacia adelante y la izquierda hacia atrás, el robot rotará hacia la izquierda. Para rotar a la derecha, hay que hacer justo lo contrario.



Encoders y Cinemática Diferencial (cont.)

- 🤖 Además de las ruedas motrices, también hay dos ruedas **locas**.
- 🤖 Las ruedas locas son ruedas pasivas (como las ruedas de los carritos de los supermercados), que simplemente se utilizan para darle estabilidad al robot móvil.
- 🤖 No tienen motores y normalmente tampoco suelen tener *encoders*.

Encoders y Cinemática Diferencial (cont.)

- 🤖 Cada una de las ruedas motrices tiene su *encoder* en esta configuración.
 - 🤖 Por lo tanto, se tiene el *encoder* de la derecha y el de la izquierda.
- 🤖 Estos *encoders*, suelen tener una resolución concreta que se mide en unidades de **pulsos/revolución**, es decir, cuantos **pulsos** mide el *encoder* en una revolución completa del eje.
- 🤖 Los *pulsos* se pueden entender como una medida discreta de los ángulos.
 - 🤖 Es decir, si el *encoder* tiene una precisión de 360 pulsos/revolución, la resolución angular del *encoder* es de 1 grado.
 - 🔵 Por cada grado que gire el eje, se tiene un **pulso**.



Errores Sistemáticos

- 🤖 Los diámetros de las ruedas no son iguales.
- 🤖 La media de los diámetros de las ruedas difieren del diámetro de fábrica de las ruedas.
- 🤖 Mal alineamiento de las ruedas.
- 🤖 Resolución discreta (no continua) del *encoder*.
- 🤖 La tasa de muestreo del *encoder* es discreta.



Errores No Sistemáticos

- 🤖 Desplazamiento en suelos desnivelados.
- 🤖 Desplazamiento sobre objetos inesperados que se encuentren en el suelo.
- 🤖 Patinaje de las ruedas debido a:
 - 🤖 Suelos resbaladizos.
 - 🤖 Sobre-aceleración.
 - 🤖 Derrapes (debidos a una rotación excesivamente rápida).
 - 🤖 Fuerzas externas (interacción con cuerpos externos).
 - 🤖 No hay ningún punto de contacto con el suelo.



Errores de la Odometría

- 🤖 Una clara distinción entre errores sistemáticos y no sistemáticos es de gran importancia a la hora de reducir los errores en la odometría.
 - 🤖 Por ejemplo, los errores sistemáticos son específicamente graves, porque se acumulan constantemente.
- 🤖 En muchas superficies no rugosas de entornos interiores, los errores sistemáticos contribuyen muchos más a los errores en la odometría que los errores no sistemáticos.
- 🤖 Sin embargo, en superficies que agarran bien con irregularidades significativas, son los errores no sistemáticos los que predominan.

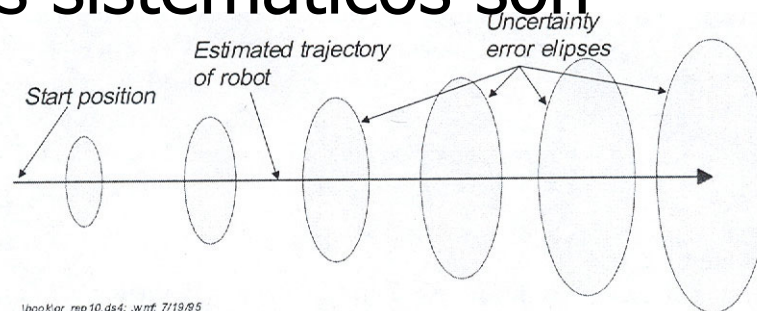


Errores de la Odometría

- 🤖 El problema de los errores no sistemáticos es que pueden aparecer inesperadamente (por ejemplo cuando el robot pasa por encima de un objeto que se encuentra en el suelo), y pueden causar errores muy grandes en la estimación de la posición.
- 🤖 Cabe destacar que muchos investigadores han desarrollado algoritmos para estimar la incertidumbre en la posición de un robot que utiliza odometría.
- 🤖 Según estos enfoques, cada posición calculada por el robot está rodeada por una **elipse de error** característica, la cual indica la región de incertidumbre para la posición actual del robot.

Estimación del Error de Posición

- 🤖 Detectar la incertidumbre en la posición.
- 🤖 Cada posición está rodeada por una **elipse de error característico** que indica la región de incertidumbre.
- 🤖 Estas elipses crecen en tamaño con la dirección de marcha hasta la posición absoluta que reinicia la medición del tamaño del elipse de error.
- 🤖 Sólo los errores sistemáticos son considerados.



Medición de los Errores de Odometría

- 🤖 Borenstein & Feng establecieron un modelo simplificado de error para los errores sistemáticos.
- 🤖 A su juicio, las dos causas dominantes de errores:
 - 🤖 Diámetros desiguales de ruedas
 - 🦋 $E_d = D_R / D_L$
 - 🤖 La incertidumbre acerca de la distancia entre ejes
 - 🦋 $E_b = b_{\text{actual}} / b_{\text{nominal}}$

Prueba Unidireccional Camino Cuadrado

El robot inicia en una posición (x_0, y_0, θ_0) , llamada INICIO.

Entonces se mueve a lo largo de una trayectoria cuadrada a una posición de retorno $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_\theta)$.



$$\epsilon_x = x_{abs} - x_{calc}$$



$$\epsilon_y = y_{abs} - y_{calc}$$

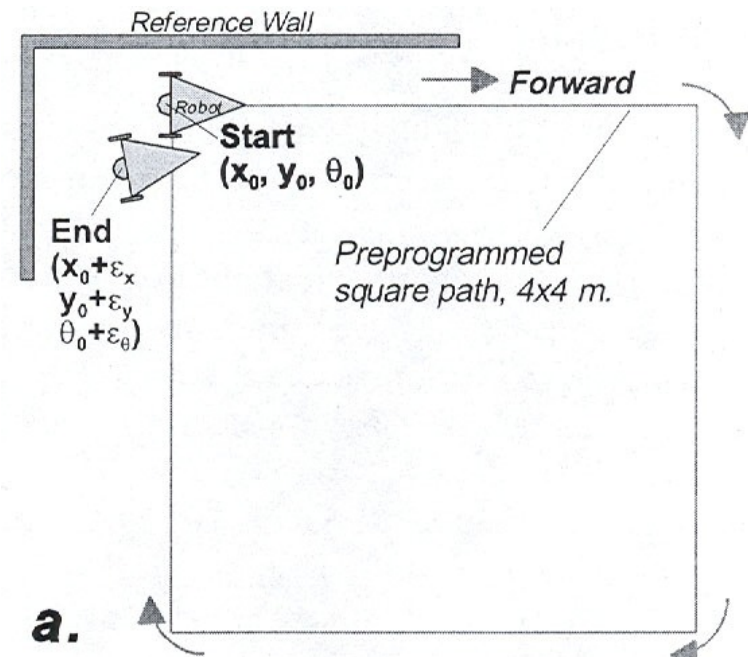


$$\epsilon_\theta = \epsilon_{abs} - \epsilon_{calc}$$

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_\theta$ Posición y orientación de los errores debidos a la estimación.

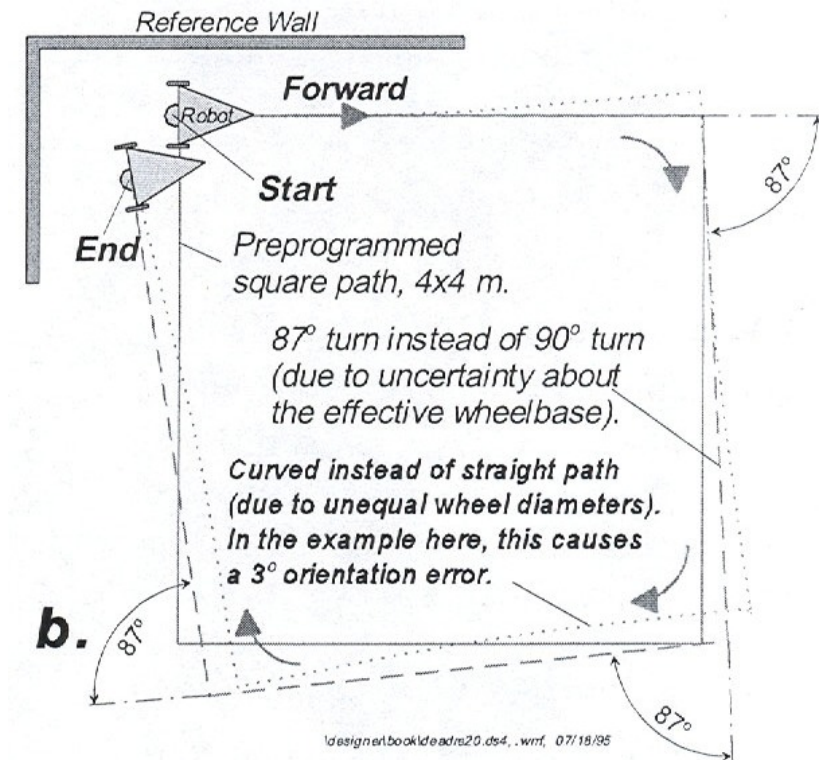
$x_{abs}, y_{abs}, \epsilon_{abs}$ La posición y orientación absoluta del robot.

$x_{calc}, y_{calc}, \epsilon_{calc}$ La posición y orientación del robot como se calculó a partir de la estimación.



Inconveniente

- ❗ No es posible determinar si los diámetros desiguales o la incertidumbre acerca de la distancia entre ejes es la causa del error.
- ❗ No es capaz de identificar si dos errores se compensan entre sí.





Prueba Bidireccional Camino Cuadrado

- 🤖 Supera el inconveniente de la prueba unidireccional.
- 🤖 El principio es que dos errores sistemáticos dominantes que se pueden compensar entre sí en una dirección se suman en la dirección opuesta.

Prueba Bidireccional Camino Cuadrado

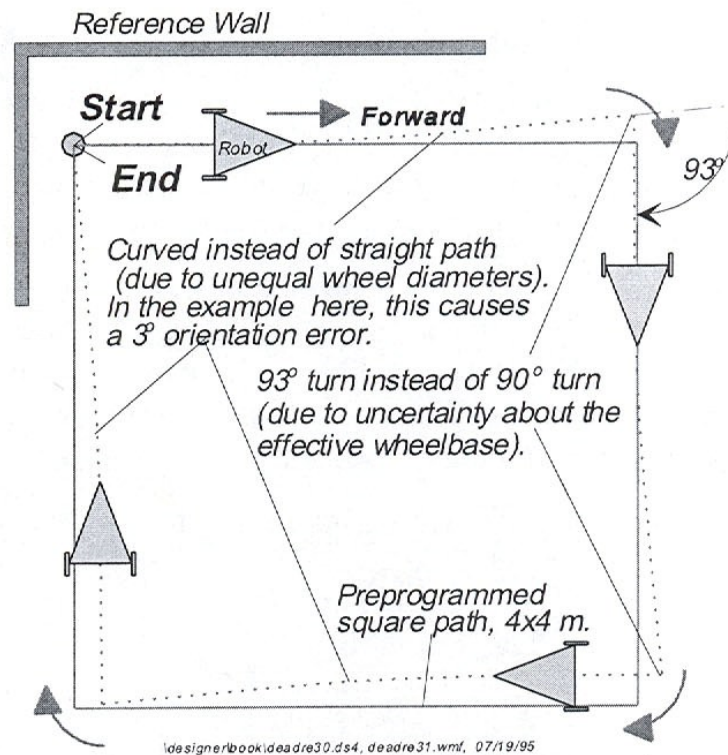


Figure 5.3: The effect of the two dominant systematic dead-reckoning errors E_b and E_d . Note how both errors may cancel each other out when the test is performed in only one direction.

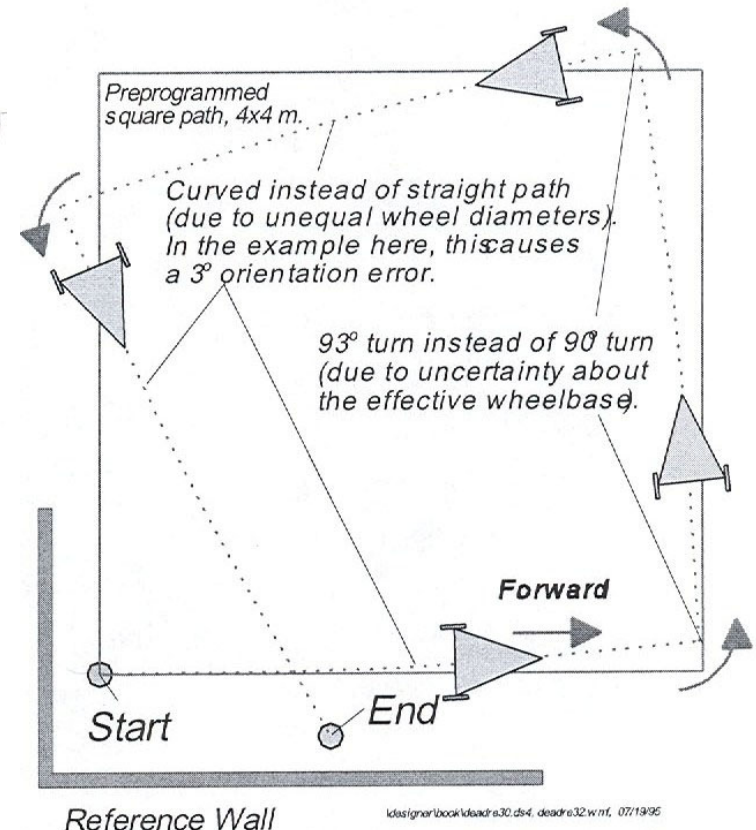


Figure 5.4: The effect of the two dominant systematic odometry errors E_b and E_d : when the square path is performed in the opposite direction one may find that the

Prueba UMBmark

$$x_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon x_{i,cw/ccw}$$

$$y_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon y_{i,cw/ccw}$$

$$r_{c.g.,cw} = \sqrt{(x_{c.g.,cw})^2 + (y_{c.g.,cw})^2}$$

and

$$r_{c.g.,ccw} = \sqrt{(x_{c.g.,ccw})^2 + (y_{c.g.,ccw})^2} .$$

$$E_{\max, \text{syst}} = \max(r_{c.g.,cw} ; r_{c.g.,ccw})$$

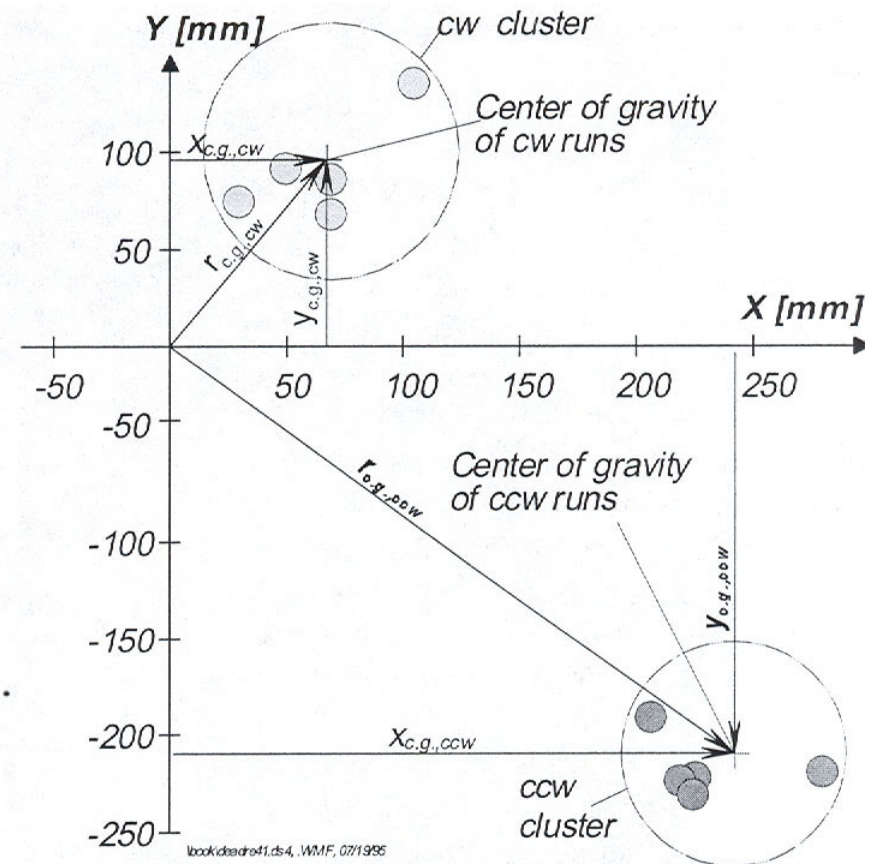


Figure 5.5: Typical results from running UMBmark (a square path run in both cw and ccw directions) with an uncalibrated vehicle.

clockwise (cw)
counter-clockwise (ccw)



Medición de Errores No Sistemáticos

- 🤖 Parte de la información puede derivarse de la propagación de errores de posición de retorno.
- 🤖 Esto puede ser a través de la desviación estándar estimada σ .
- 🤖 Esto depende del robot y de la superficie, y puede ser diferente para diferentes tipos de robots en la misma planta.
- 🤖 Por lo tanto es casi imposible diseñar un procedimiento de prueba para errores no sistemáticos.

UMBmark Extendido

Error de orientación absoluto promedio

$$\epsilon\theta_{avrg}^{nonsys} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\epsilon\theta_{i,cw}^{nonsys} - \epsilon\theta_{avrg,cw}^{sys}| + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\epsilon\theta_{i,ccw}^{nonsys} - \epsilon\theta_{avrg,ccw}^{sys}|$$

$$\epsilon\theta_{avrg,cw}^{sys} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon\theta_{i,cw}^{sys}$$

and

$$\epsilon\theta_{avrg,ccw}^{sys} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon\theta_{i,ccw}^{sys}$$

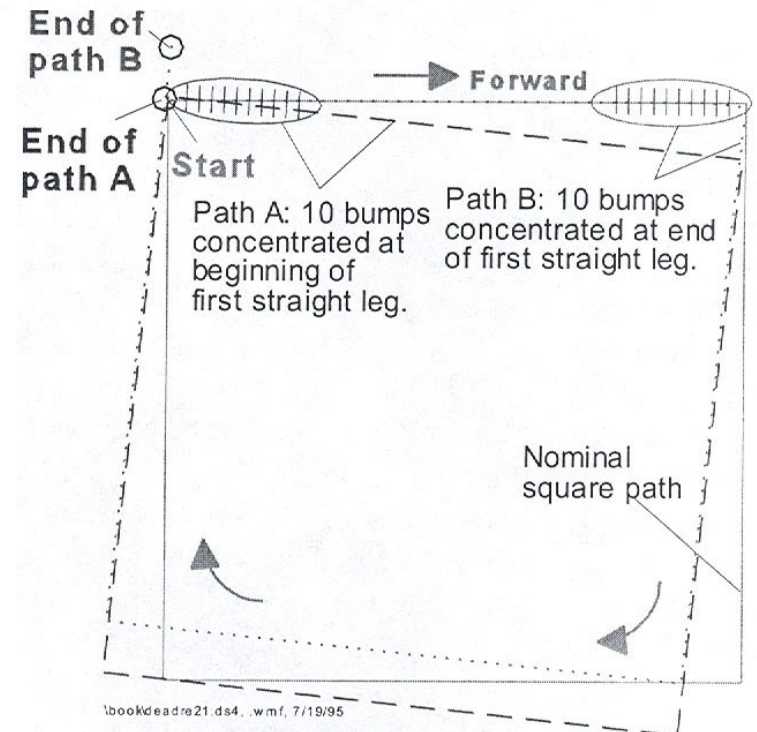


Figure 5.6: The return *position* of the extended UMBmark test is sensitive to the exact location where the 10 bumps were placed. The return *orientation* is not.



Parámetro Medible

- 🤖 Si los baches se concentran al principio del error de posición, la primera vuelta será pequeña, a la inversa, si se concentran hacia el final, entonces el error de retorno será mayor.
- 🤖 Por lo tanto devolver el error de posición no es una buena opción.
- 🤖 En cambio, el error de orientación de retorno ε_θ se debe utilizar.



Especificaciones sobre Golpes

- 🤖 Los baches deben parecerse a un cable de un diámetro de 9 a 10 milímetros.
- 🤖 10 baches deben ser distribuidos lo más uniformemente posible.
- 🤖 Los baches debe introducirse durante el primer segmento de la trayectoria del cuadrado a lo largo de la rueda que se enfrenta el interior de la plaza.
- 🤖 El efecto es un error de orientación en la dirección de la rueda que se encontró con el bache.



Reducción de los Errores de Odometría

- 🤖 Los vehículos con una distancia entre ejes pequeños son más propensos a los errores de orientación.
- 🤖 Ruedas giratorias que llevan porción significativa de peso es probable que induzcan el deslizamiento.
- 🤖 El diseño *synchro-drive* proporciona mejor precisión odométrica.
- 🤖 Las ruedas utilizadas para odometría deben ser de filo delgadas y no compresible.

Ruedas Auxiliares

- 🤖 Junto con ruedas de *encoder* también tienen ruedas de acero especialmente para la codificación.
- 🤖 Factible para un triciclo diferencial de unidad de accionamiento, y los vehículos Ackerman.

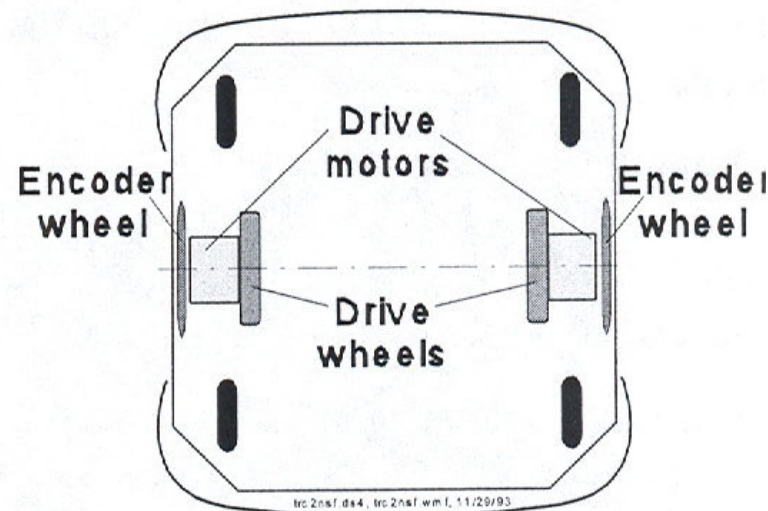


Figure 5.7: Conceptual drawing of a set of *encoder wheels* for a differential drive vehicle.



Calibración Sistemática

- 🤖 Necesidades UMBtest. Las características de error sólo tienen sentido en el contexto de UMBtest.
- 🤖 Tipo A - Error de orientación que reduce o aumenta en ambas direcciones.
- 🤖 Tipo B - Error de orientación que reduce en una dirección pero aumenta en otra dirección.

Errores Tipo A y Tipo B

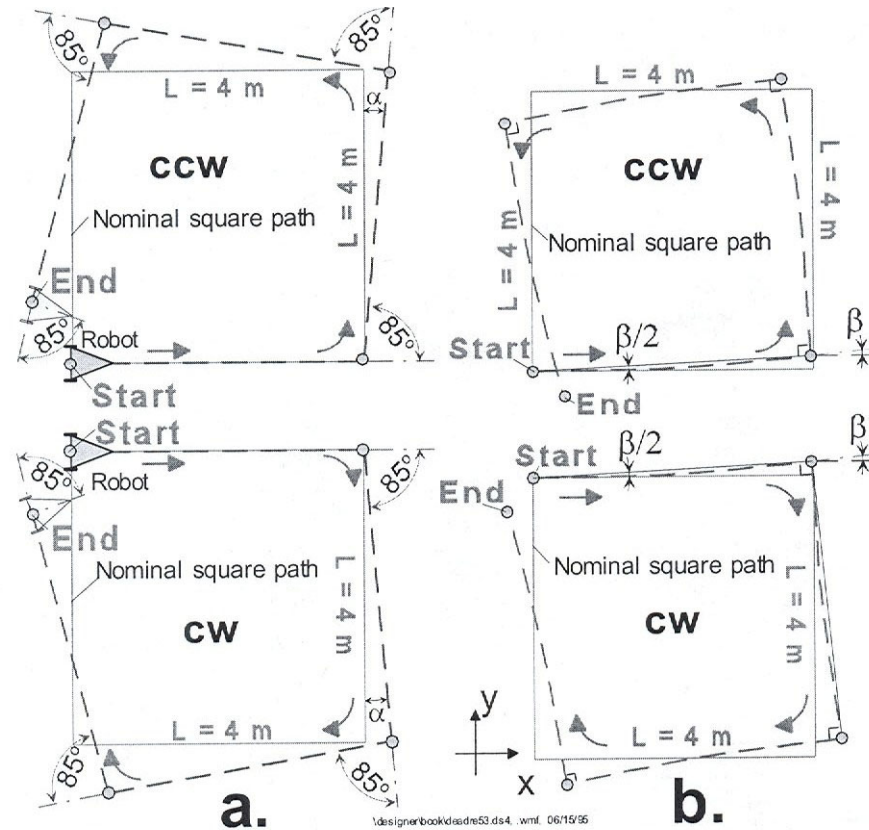


Figure 5.9: Type A and Type B errors in the ccw and cw directions. a. Type A errors are caused only by the wheelbase error E_b . b. Type B errors are caused only by unequal wheel diameters (E_d).

Determinando Tipo A o Tipo B

Tipo A

 $|\Theta_{\text{total,cw}}| < |\Theta_{\text{nominal}}| \text{ AND } |\Theta_{\text{total,ccw}}| < |\Theta_{\text{nominal}}|$

Tipo B

 $|\Theta_{\text{total,cw}}| < |\Theta_{\text{nominal}}| \text{ AND } |\Theta_{\text{total,ccw}}| > |\Theta_{\text{nominal}}|$

Determinando Tipo A o Tipo B



Este modelo supone que

1. E_d y E_b son las principales fuentes de errores sistemáticos *dead-reckoning*.
2. Una distancia entre ejes incorrecta (E_b) causa errores sólo durante el giro, pero no durante el movimiento en línea recta.
3. Diámetros desiguales en las ruedas (E_d) causar errores sólo durante el movimiento en línea recta, pero no durante el giro.
4. E_b provoca sólo los errores de tipo A, pero no del tipo B.
5. E_d provoca sólo errores de tipo B, pero no del tipo A.
6. Debido al supuesto 1, eliminando E_b se elimina del sistema los errores de Tipo A casi completamente.
7. Debido al supuesto 1, eliminando E_d se elimina del sistema los errores de Tipo B casi completamente.
8. Errores de orientación son la principal fuente de preocupación porque una vez que se incurre en ellos crecen sin límite en los errores de posición laterales.

Computación para Diámetros

🤖 α es el error en el ángulo de rotación (es el error en grados cuando el robot trata de girar 90 grados)

🤖 $\alpha = (x_{c.g,cw} + x_{cg,ccw})/(-4L)$

🤖 β es el ángulo que el robot se desvía (es el ángulo en grados, el robot se salió de un camino recto después de correr la distancia L)

🤖 $\beta = (x_{c.g,cw} - x_{cg,ccw})/(-4L)$

🤖 R es el radio de curvatura de la trayectoria curva

🤖 $R = (L/2)/\sin(\beta/2)$

🤖 $E_d = D_R/D_L = (R+\beta/2)/(R-\beta/2)$

Computación para Distancia entre Ejes


$$b_{\text{actual}}/90 = b_{\text{nominal}}/(90-\alpha)$$


$$b_{\text{actual}} = (90/(90-\alpha)) b_{\text{nominal}}$$


$$\text{Entonces: } E_b = 90/(90-\alpha)$$

Correcciones

🤖 Para mantener el diámetro medio constante se tiene:

$$\text{🤖 } D_a = (D_R + D_L)/2$$

🤖 El uso de esto y la ecuación para E_d se obtiene:

$$\text{🤖 } D_L = 2.D_a / (E_d + 1)$$

$$\text{🤖 } D_R = 2.D_a / ((1/E_d) + 1)$$

Resultados

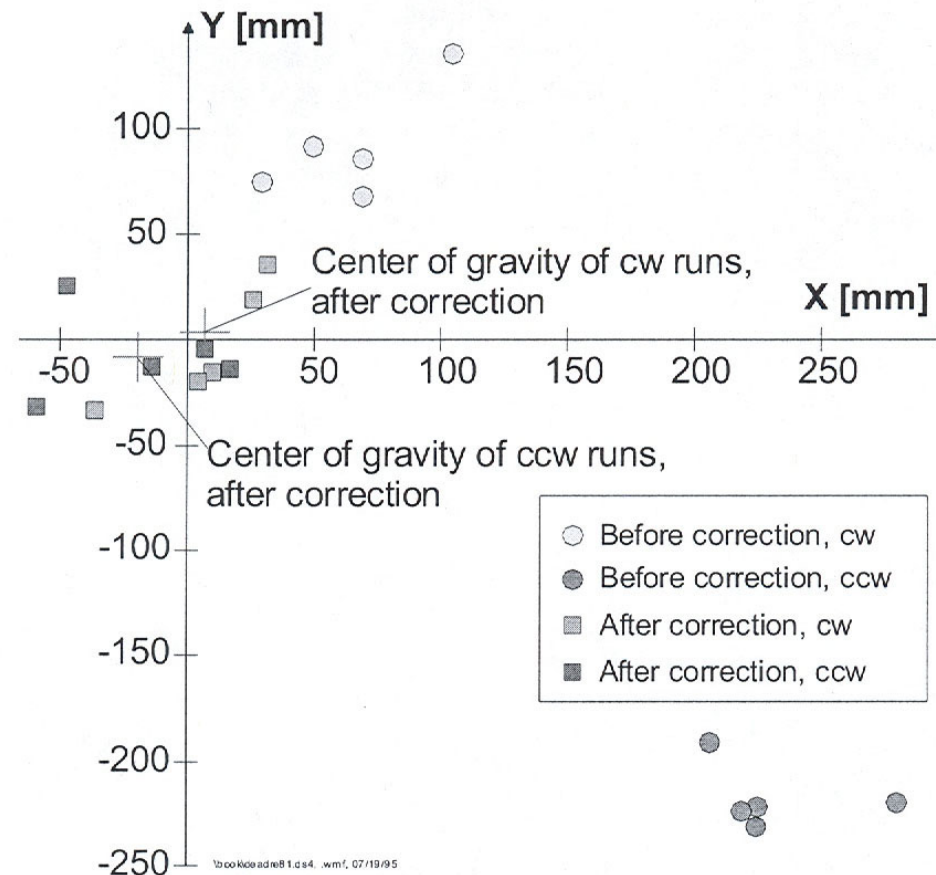


Figure 5.10: Position errors after completion of the bidirectional square-path experiment (4 x 4 m).

Before calibration: $b = 340.00$ mm, $D_R/D_L = 1.00000$.

After calibration: $b = 336.17$, $D_R/D_L = 1.00084$.



Referencias Bibliográficas

- 🤖 Wikipedia. Odometría. URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Odometr%C3%AD>.
- 🤖 Robótica: Estimación de posición por odometría. URL: <http://cuentos-cuanticos.com/2011/12/15/robotica-estimacion-de-posicion-por-odometria/>
- 🤖 Borenstein J. ; Everett, H.R. & Feng L. "Where am I?" Sensors & Methods for Mobile Robot Positioning Ch.5.
- 🤖 Borenstein J. & Feng L. "Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors In Mobile Robots".





¡Gracias!



Dra. Kryscia Daviana Ramírez Benavides
Profesora e Investigadora
Universidad de Costa Rica
Escuela de Ciencias de la Computación e Informática

Sitio Web: <http://www.kramirez.net/>
E-Mail: kryscia.ramirez@ucr.ac.cr
kryscia.ramirez@ecci.ucr.ac.cr

Redes Sociales:

