

Medidor de aceleración y recorrido

Perez Hugo; Kim Ariel; Cali Carlos

Abstract—Aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la materia mediante el desarrollo y construcción de un sistema/dispositivo prototipo (Hardware y Software) utilizando un microcontrolador de arquitectura compatible con ARM junto a un sensor acelerométrico y girométrico integrado.

Index Terms—Accelerometer, Digital filter, Gyroscopes, IIR filter, Displacement, Level control.

I. INTRODUCCION

El equipo propuesto es básicamente un inclinómetro en base a un conjunto de sensores (acelerómetro y giróscopo, ambos de 3 ejes) el cual proyecta las aceleraciones de los acelerómetros en el eje paralelo a la gravedad. Se utilizó un filtro complementario para el cálculo de las inclinaciones dado a que el ARM Cortex-M3 es un procesador de propósito general y el filtro de Kalman necesita realizar muchas operaciones matemáticas matriciales. Luego para la proyección de las aceleraciones, se utiliza simple geometría, y finalmente se saca la gravedad de la medición y se calcula el desplazamiento con una doble integral de la aceleración.

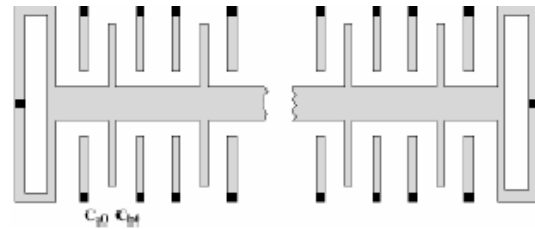
II. FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

A. Acelerómetro

El sensor elegido MPU-6050, es un chip que integra un acelerómetro y giróscopo en un mismo encapsulado.

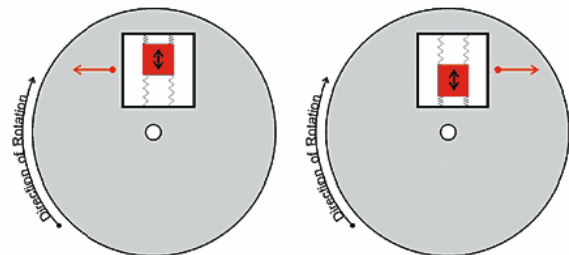
El sector correspondiente al acelerómetro se encuentra formado internamente por un conjunto de capacidades fijas (ancladas al circuito) y por un conjunto de placas centrales que se encuentran unidas a unos anillos elásticos que permiten el movimiento de dichas placas.

Cuando se aplique una aceleración en la dirección de la placa central (que se encuentra entre ambas capacidades) esta se moverá provocando que una de las capacidades aumente y la otra disminuya. De este modo, midiendo las capacidades se puede obtener el valor de la aceleración.



B. Giróscopo

El módulo del giróscopo aplica el efecto de la aceleración de coriolis usando una masa que se desplaza de forma radial, como se puede observar en la siguiente figura. La masa es micromecanizada de polisilicio y atada a una estructura de polisilicio de tal forma que pueda vibrar a lo largo de una dirección. Cuando la masa que vibra se mueve hacia el extremo exterior de la plataforma, esta experimenta una fuerza de reacción hacia la izquierda, por el contrario cuando se mueve hacia el centro de rotación la experimenta hacia la derecha.



C. Diagrama en bloques

El microcontrolador se encarga de adquirir 50 muestras por segundo del sensor, mediante el protocolo de comunicación I2C. Luego dicha información es acondicionada y enviada al filtro complementario que se encarga de procesar la información ponderando el acelerómetro cuando se encuentra el dispositivo estático o al giróscopo cuando se encuentra en movimiento, para sacar las 3 inclinaciones.

Esta diferencia de ponderación se debe a que el acelerómetro es más preciso y exacto cuando se encuentra en reposo y el giróscopo cuando se encuentra en movimiento.

En paralelo procedemos a filtrar solamente los acelerómetros a través de un filtro de medio móvil.

Finalmente con las aceleraciones y las inclinaciones, se proyecta cada componente en el eje que es paralelo a la gravedad, esta aceleración final es enviada por USB a un software que realiza la doble integral para calcular el desplazamiento y es graficado.

Si se desea se puede visualizar las inclinaciones en el

Manuscrito elaborado en Diciembre 2013. Dicho trabajo fue apoyado en parte por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Buenos Aires (FRBA) bajo la cátedra de Medidas Electrónicas I, carrera de Ingeniería Electrónica.

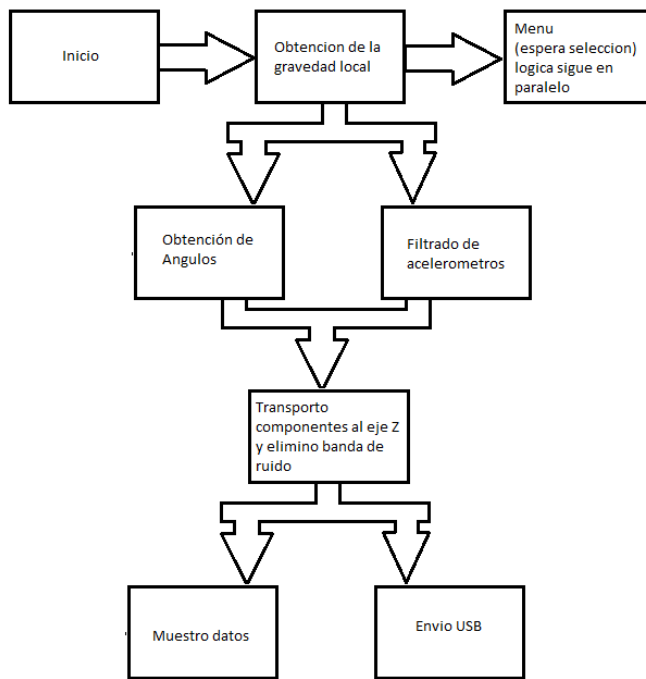
P. H. Estudiante Ingeniería Electrónica FRBA
(e-mail: hugojperez@gmail.com).

K. A Estudiante Ingeniería Electrónica FRBA
(e-mail: kimariel89@gmail.com).

C. C Estudiante Ingeniería Electrónica FRBA
(e-mail: ccali_09@hotmail.com).

L. C. Estudiante Ingeniería Electrónica FRBA
(e-mail: cismondil@gmail.com).

display con el que cuenta el equipo.



D. Filtro Complementario

En la adquisición de señales intervienen varios factores que influyen sobre la señal a medir. Estas pueden ser desde ruido, efectos térmicos, o hasta señales de la misma naturaleza que la propia señal a medir.

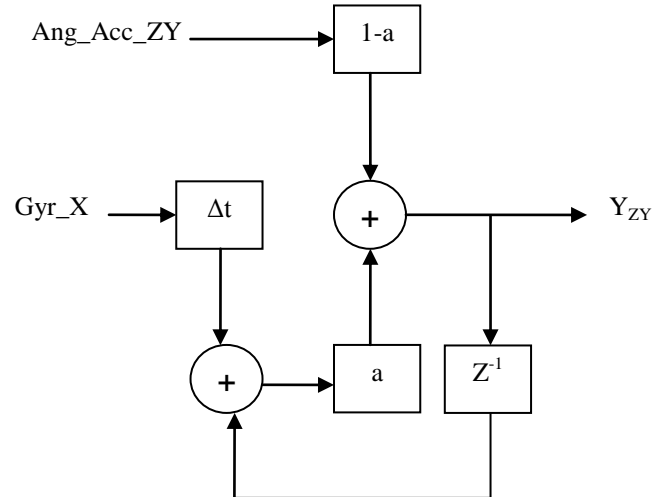
Muchas veces, cuando los niveles de estos factores, de ahora en más considerados ruido, son muy grandes, pueden hasta enmascarar la información que uno desea obtener.

En nuestro caso particular, necesitamos medir inclinación en los tres ejes cartesianos con mucha precisión, por lo cual hemos optado por elegir como sensores acelerómetros y giróscopos, uno en cada uno de los ejes.

Luego de realizar varias mediciones notamos dos aspectos a tener en cuenta:

- La obtención de la inclinación por medio de acelerómetros es rápida y precisa, pero tiende a variar en torno al valor verdadero, debido a vibraciones y a las aceleraciones intervinientes que no son la aceleración de la gravedad.
- La obtención por medio de giróscopos no tiene ese inconveniente, pero en la medida en que el tiempo transcurre se observa una deriva con respecto del valor verdadero, debido principalmente a la forma en que se obtiene el ángulo (integrando velocidad angular con respecto del tiempo)

El siguiente diagrama en bloques muestra la forma de trabajo del filtro.



Se podría suponer que si las componentes de baja frecuencia se calculan mediante acelerómetros y las componentes de mayor frecuencia con el giróscopo, se debería obtener una medición bastante exacta. De allí por lo que se lo denomina complementario, la suma de ambas formas de medición tiene que dar la medición real.

Por lo tanto la medición con acelerómetros es buena midiendo las componentes de baja frecuencia de la inclinación, mientras que la medición con giróscopos es buena midiendo las componentes de alta frecuencia.

Dadas las siguientes expresiones obtenidas del diagrama en bloques:

$$\begin{cases} E_1 = Gry. \Delta t + Y. Z^{-1} \\ Y = Acc. (1 - \alpha) + E_1. \alpha \end{cases}$$

$$\begin{aligned} Y &= Acc. (1 - \alpha) + [Gry. \Delta t + Y. Z^{-1}]. \alpha \\ Y &= Acc. (1 - \alpha) + Gry. \Delta t. \alpha + Y. Z^{-1}. \alpha \\ Y - Y. Z^{-1}. \alpha &= Acc. (1 - \alpha) + Gry. \Delta t. \alpha \\ \rightarrow Y_{[n]} - Y_{[n-1]}. \alpha &= Acc_{[n]}. (1 - \alpha) + Gry_{[n]}. \Delta t. \alpha \end{aligned}$$

$$Y_{[n]} = Acc_{[n]}. (1 - \alpha) + Gry_{[n]}. \Delta t. \alpha + Y_{[n-1]}. \alpha$$

Al iniciar tarda un lapso de tiempo en encontrar los valores de los ángulos. Esto se debe a los valores del giróscopo que varían mucho. Por eso tomamos varias muestras mientras el equipo inicia y se ajustan los angulos

Una vez que el ángulo es obtenido correctamente (es decir luego de la variación errática) el valor de medición permanece constante, sin variar debido al ruido.

En la medida en que α aumenta (tiende a 1) aumenta el tiempo que tarda en estabilizarse, pero disminuye la velocidad de variación de la medición del ángulo. Esto es debido a que el resultado informado depende mucho más del giróscopo que del acelerómetro, traduciéndose así en las ventajas y desventajas del mismo mostradas en los aspectos del giróscopo (rechazo a vibraciones pero deriva).

Para poder tener un rendimiento optimo debe encontrarse una solución de compromiso entre ambos sensores, en las que se potencien las ventajas y se reduzcan al mínimo las desventajas.

Luego de repetidos ensayos, llegamos a la conclusión de que el mejor valor a adoptar de α es 6/11.

E. Filtro Media Movil Exponencial

El acelerómetro es un sensor muy sensible al ruido (además de estar siempre influenciado por la gravedad). Por lo que necesitamos filtrar este ruido y para obtener una señal estable, pero también necesitamos un filtro que responda rápido a los cambios, ya que luego la aceleración será afectada por los ángulos medidos, por este motivo elegimos el filtro de media móvil exponencial. El cual tiene la siguiente ecuación:

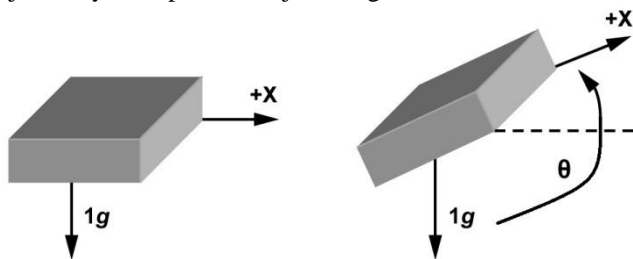
$$AccFilt = AccOld.(1 - \alpha) + AccNew.\alpha$$

mientras más cercano a cero sea el valor de α mas fuerte será el filtrado, y mientras más cercano a uno sea menor será el filtrado.

En nuestro caso de manera empirica seteamos el valor de α en 0,2

F. Proyección de la aceleración sobre eje Z

Los ángulos que obtuvimos anteriormente son los ángulos del eje Z, Y y X respecto del eje de la gravedad

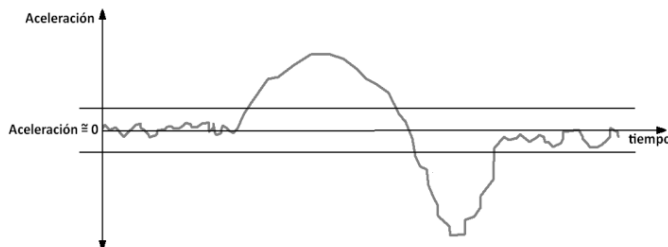


por lo que, con simple trigonometria podemos proyectar sobre el eje Z (paralelo a la gravedad) de la siguiente manera:

$$Acc = \sum_i Acc_i * \cos(Ange_i)$$

Siendo la sumatoria de los tres sensores del mpu6050 afectados cada uno por su correspondiente angulo

Una vez que obtenemos la aceleracion, le restamos la gravedad para quedarnos solamente con la aceleracion neta, como ya dijimos los acelerómetros son muy ruidosos y sensibles, por lo tanto tenemos que establecer una banda de ruido. Cualquier valor de aceleracion que caiga en esta banda la consideramos de valor cero.

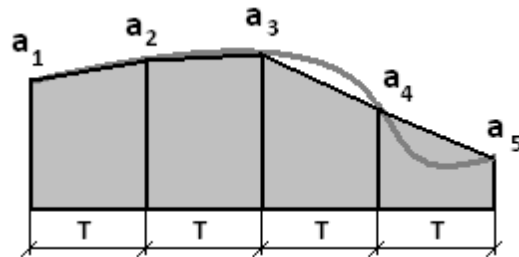


Luego, la aceleracion esta lista para ser procesada.

G. Doble integral

Para el cálculo de la distancia recorrida, hay que realizar una integral doble sobre la señal de aceleración. Esto significa que la superficie formada por el trapecio cuya altura es el tiempo de muestreo, y bases son el valor de una muestra y la anterior,

determinará la función velocidad, la cual realizándole el mismo procedimiento determinará la función distancia. En este cálculo es importante que la frecuencia de muestreo sea tal, que asegure que la aproximación que se realiza al linealizar el segmento entre dos muestras, tenga un error pequeño. Entonces cuanto más alta sea la frecuencia de muestreo, no solo se tendrán ventajas en la disminución del efecto del ruido, sino que la superficie del trapecio será más parecida a la real. Dicha frecuencia de muestreo, debe ser lo más exacta posible entre cada muestra, ya que representará la altura del trapecio, así como el error de cuantización y el ruido afectarán a las bases de dicho trapecio.



La función encargada del cálculo de la posición, es la ecuación horaria de física, pero que tiene en cuenta la aproximación del trapecio.

$$v = v_0 + a * t + \frac{a - a_0}{2} * t$$

$$p = p_0 + v * t + \frac{v - v_0}{2} * t$$

III. RANGO DE MEDICION

El rango de medición no esta afectado por el ángulo a medir sino con factores intervinientes en los sensores:

- **Giróscopo:** Puede medir velocidades angulares de hasta 250°/seg, en la forma en que esta configurado, para obtener una precisa discretizacion de los valores de velocidad angular. Para la utilización de un ser humano es suficiente.
- **Acelerómetro:** Si bien tiene un rango de $\pm 2g$, hay que tener en cuenta que cualquier componente de aceleración que no sea debida a la gravedad puede afectar las mediciones. Por lo cual no puede ser utilizado en móviles que no tengan velocidad constante. Tampoco puede ser utilizado en regiones del espacio donde la gravedad difiera de forma muy significativa a la de la tierra.

IV. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Se realizó la calibración del equipo en el *Laboratorio de Metrología* de la *Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRBA)*. El banco de trabajo consistió en una mesa nivelada, especial para este tipo de mediciones.

Agradecemos al Ing. Forastieri y a todos los profesores del Laboratorio de Metrología de la UTN FRBA por sus colaboraciones, recomendaciones y el aporte de instrumental para lograr la calibración del proyecto.

Se realizó el ajuste de offset colocando el inclinómetro sobre la mesa nivelada, considerados esta

medición como 0 absoluto. Para ello, se tomaron 10 mediciones de las indicaciones de la salida del sensor del acelerómetro y del giróscopo y se agregó un *offset* a la medición para cada eje del acelerómetro y giróscopo.

El ajuste de offset que se agregó es el siguiente (expresado en cuentas):

$$\text{Acc_X} = -27$$

$$\text{Acc_Y} = -419$$

$$\text{Acc_Z} = -195$$

$$\text{Gyr_X} = -258$$

$$\text{Gyr_Y} = -120$$

$$\text{Gyr_Z} = 48$$

V. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE DEL INSTRUMENTO

Evaluada la propagación del error debido al tratamiento de la información dentro del microcontrolador se obtuvieron los siguientes resultados, midiendo en distintas inclinaciones el valor de la gravedad en el eje Z, ya que este valor será desafectado por una gravedad constante y enviado para procesarse:

$$u(y)^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 * u(x_i)^2 + 2 * \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} * \frac{\partial y}{\partial x_j} * u(x_i) * u(x_j) * r(x_i, x_j)$$

Mediciones:

Mediciones						
Muestras	Acc _Z	Acc _Y	Acc _X	AngVert _Z	AngVert _Y	AngVert _X
Posición 1						
1	3.39918	-0.28395	9.23565	69.65	91.74	20.42
2	3.39561	-0.2712	9.26097	69.87	91.56	20.19
3	3.38779	-0.26972	9.28098	69.95	91.52	20.11
4	3.39671	-0.2879	9.27957	69.97	91.7	20.1
5	3.38812	-0.3133	9.26427	70.02	91.91	20.07
6	3.39528	-0.25536	9.28031	69.98	91.31	20.06
7	3.39153	-0.29457	9.26102	69.85	91.77	20.22
8	3.38708	-0.27247	9.26173	69.84	91.64	20.22
9	3.38425	-0.27328	9.26125	69.99	91.51	20.06
10	3.38641	-0.26213	9.27065	69.96	91.55	20.1
Media	3.391196	-0.278388	9.26564	1.2201247735	1.599088114	0.3517711107
Posición 2						
1	-0.0279	-5.75671	7.8262	90.25	126.24	36.24
2	0.00868	-5.72494	7.79	89.89	126.35	36.35
3	-0.01502	-5.74419	7.79453	90.17	126.53	36.53
4	-0.03387	-5.74465	7.81522	90.21	126.34	36.34
5	0.00805	-5.73425	7.80901	89.91	126.22	36.22
6	0.00689	-5.74176	7.81606	89.87	126.32	36.32
7	-0.00414	-5.72519	7.79773	90.01	126.27	36.27
8	0.00473	-5.73189	7.79462	89.98	126.28	36.28
9	-0.01869	-5.72879	7.80249	90.18	126.33	36.33
10	-0.00537	-5.73412	7.82606	89.95	126.29	36.29
Media	-0.007664	-5.736649	7.807192	1.5715293651	2.2046475512	0.6338512244
Posición 3						
1	2.16313	-2.61984	9.20344	77.27	105.47	20.23
2	2.13111	-2.63013	9.17833	77.4	105.66	20.3
3	2.13617	-2.63937	9.20051	77.48	105.6	20.21
4	2.15746	-2.63355	9.20467	77.25	105.56	20.33
5	2.16208	-2.63379	9.1854	77.29	105.53	20.27
6	2.14393	-2.64353	9.2002	77.36	105.63	20.31
7	2.15319	-2.66703	9.21608	77.35	105.77	20.42
8	2.13784	-2.61945	9.18696	77.33	105.42	20.16
9	2.14281	-2.64726	9.17831	77.3	105.8	20.48
10	2.13897	-2.63899	9.19359	77.47	105.56	20.18
Media	2.146669	-2.637294	9.194749	1.3500121764	1.8430676901	0.3541098519

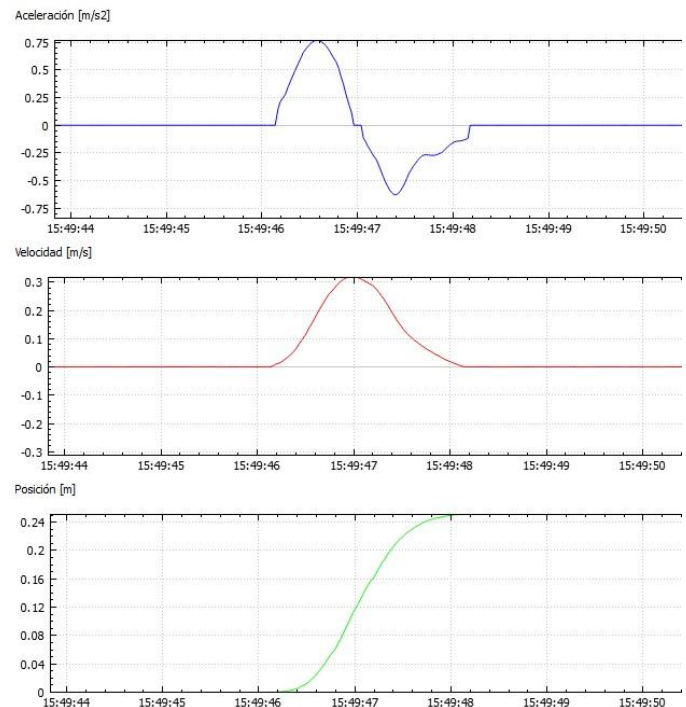
Incetidumbre expandida

Incetidumbre			
	Posición 1	Posición 2	Posición 3
Total	1,04	1,48	0,00019
Expandida(k=2)	2,08	2,97	0,00038
AccZtrans	9,87	9,69	9,80360

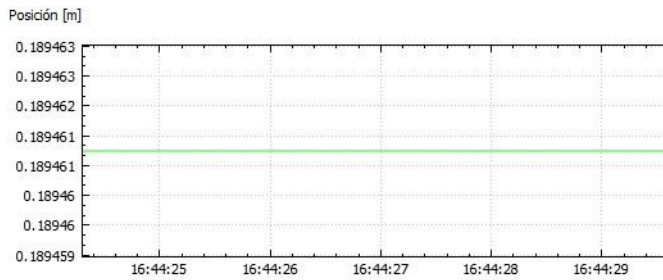
VI. MEDIC/IONES REALIZADAS

La idea principal fue calibrar la distancia recorrida del aparato utilizando un carrito de impresora, pero las vibraciones del mismo eran tales que no podíamos obtener ninguna medición correcta, es por eso que se hicieron mediciones levantando el aparato distancias conocidas, aceptando el error que nos sumara este método, pero igualmente comprobando que el mismo mide estas alturas con un error aceptable.

En este caso el aparato fue levantado 25 cm



En este caso fueron 19 cm y solo mostramos el grafico de posicion



Estas mediciones se realizaron varias veces cada una y siempre se mantuvo en un valor bastante aproximado

VII. CONCLUSIONES

Si bien se puede observar que los sensores de estado sólido acelerómetro y giróscopo tienen muchas desventajas, es posible realizar mediciones sumamente confiables sacando partido de las ventajas que ambos poseen.

Es sumamente conveniente la utilización de los sensores integrados en el mismo chip, no solo por facilidad y rapidez, sino porque también evita la introducción de ruidos en la señal desde el sensor hasta el ADC.

Es posible la realización del filtrado sobre un microcontrolador común, sin necesidad de la implementación de un DSP, utilizando un filtro complementario en lugar del filtro de Kalman y un simple media móvil.

En rasgos generales el proyecto cumple su cometido. Pero podemos concluir que los acelerómetros no son la mejor opción a la hora de querer medir desplazamiento, y esto se debe a que cualquier vibración afecta la medición en gran parte.

VIII. TRABAJOS FUTUROS

El dispositivo cuenta con una conexión a la PC, en la cual se podría realizar un procesamiento en MATLAB, aprovechando de esta forma la potencia de esta herramienta.

También se podría realizar sobre un microcontrolador más potente, o un DSP asociado al microcontrolador principal, en el cual se puede hacer un procesamiento más complejo y obtener mejor resolución.

Como siguiente paso, se debe utilizar sensores ópticos para medir desplazamiento y posición y comparar resultados y costos, de esta manera ver qué opción es más viable en cada caso.