

Reconstrucción de objetos bidimensionales por medio de sensor ultrasónico

Ing. Omner Peña Esparza¹, Dr. Jesús Alejandro Franco Piña²

Resumen: Las reparaciones estructurales se efectúan en el mantenimiento de cualquier aeronave; la distribución de barrenos es una práctica estándar que es parte de dicho proceso. Automatizar esta práctica estándar presenta un desafío por la forma curva de las superficies de vuelo como los bordes de ataque y el fuselaje, por lo cual se pretende crear un dispositivo que ubique los puntos en una superficie curva para que después pueda llevar a cabo una perforación y hacer la distribución de barrenos. Se presenta un trabajo en el que se estudia el ultrasonido como método de escaneo para ubicar dichos puntos, demostrando la capacidad de este método para obtener datos de medición y su viabilidad de ubicar coordenadas.

Palabras clave: Ultrasonido, puntos, medición, plana, curva, coordenadas.

Reconstruction of two-dimensional objects by means of ultrasonic sensor

Abstract: Structural repairs are necessary in the maintenance of any aircraft; maintaining and creating aircraft fastener holes and their distribution is a standard practice that is part of this process. Automating this standard practice presents a challenge because of the curved shape of flight surfaces such as the leading edges and the fuselage, thus, in the present study we intended to create a device that places the points on a curved surface so that it is possible to later carry out a drill and distribute the fastener hole correctly. In this study, ultrasound is utilized as a scanning method to locate these points, demonstrating the successful ability of this method to obtain measurement data and its viability of locating coordinates.

Keywords: Ultrasound, points, measurement, flat, curved, coordinates.

Introducción

En la actualidad, el proceso de mantenimiento para un avión debe realizarse en el menor tiempo posible; para que una aerolínea tenga utilidades de su operación, debe mantener el menor tiempo posible un avión en tierra. Se busca hacer una práctica estándar de reparación automáticamente; usando un software de programación para ubicar los puntos en una superficie para luego perforar conforme a la ubicación, recreando el proceso de una distribución de barrenos, este proceso se encuentra en la mayoría de las reparaciones estructurales, de conformidad con el manual de reparaciones estructurales de cada modelo de aeronave.

Se pretende perforar una superficie curva debido a que la mayor parte de los refuerzos de reparación en superficies primarias tienden a ser curvos. En la presente investigación, para perforar en la superficie curva, se propone usar un sensor de tipo sonar, el cual, será útil o no dependiendo de los datos de medición que pueda recibir.

Se hace el cálculo de la trayectoria de los pulsos emitidos por el sensor, tomando en cuenta la incidencia y reflexión, de esa manera se podrá saber si se pueden obtener coordenadas para efectuar la perforación de los puntos en un objeto curvo o no. Del método de ubicación y perforación, se podrá determinar si la práctica estándar de reparación se puede automatizar, en caso contrario, se concluirá con las limitantes de la metodología que se llevará a cabo. Para llevar a cabo los escaneos se usará Matlab para controlar el sensor y el motor que dará movimiento al mismo; lo anterior debido a la capacidad del software para controlar hardware de marcas como Arduino, además de la capacidad de procesar las mediciones gráficamente.

Ángulo de incidencia y reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda cuando entra en contacto con otra superficie; la onda regresa al medio donde se originó. El sonido se refleja dependiendo del ángulo de incidencia, de manera similar a como lo hace la luz en un espejo. La reflexión es máxima cuando la onda sonora choca de forma perpendicular a la interfase

¹ El Ing. Omner Peña Esparza, estudiante de Maestría en Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Aeronáutica en Querétaro, Querétaro, México, omner.pena@techops.mx (autor correspondiente)

² El Dr. Jesús Alejandro Franco Piña, profesor de cátedra de la Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, Querétaro, México alejandro.franco@unam.mx

entre dos materiales. Si el haz se aleja sólo unos cuantos grados de la zona perpendicular, el sonido reflejado no regresará a la fuente emisora y no será detectado por el transductor (Neubauer, (1973).

Se llama ángulo de incidencia el formado por el haz incidente, por lo tanto, el ángulo de reflexión es el formado por el haz reflejado. Lo normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación en el punto de incidencia del haz, tal como se puede ver en la figura 1 (Hellier, 2003).

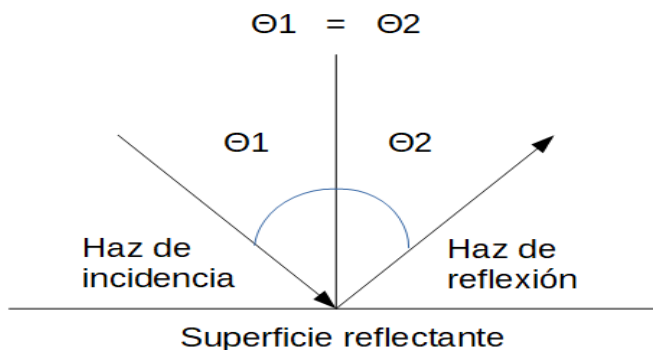


Figura 1. Haz de incidencia y de reflexión en una superficie plana (Hellier, 2003).

Cuando un haz incide sobre una superficie plana, sin imperfecciones y lisas, rebota hacia la dirección opuesta, se dice que se refleja y cumple con las “leyes de la reflexión”:

- El haz incidente forma un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el haz reflejado, el cual tiene el nombre de ángulo de reflexión.
- El haz incidente y el haz reflejado se encuentran en un mismo plano.

El haz incidente define el punto de contacto en un plano. El haz reflejado estará en ese plano y no se irá ni hacia adelante ni hacia atrás, sino que seguirá la ruta del ángulo generado por el pulso emitido hasta el objeto que se está evaluando (Rimoldi, 2012).

Velocidad de sonido aplicada al sensor HC SR04

En los gases la ecuación de la velocidad del sonido es la siguiente:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Donde:

γ = Coeficiente de dilatación adiabática

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura en Kelvin

M = Masa molar del gas

Usando la fórmula de velocidad para el sonido, la longitud de onda será la siguiente. En el medio en el que el sensor trabaja se tienen los siguientes valores:

$\gamma = 1.4$ para el aire

$R = 8.314 \text{ J (mol K)} = 8.314 \text{ kg m}^2 / (\text{mol K s}^2)$

$T = 297.1115385 \text{ K}$

$M = 0.029 \text{ kg/mol}$ para el aire

Sustituyendo estos datos en la ecuación número nueve se obtiene como resultado 345.3264055 m/s. La distancia en centímetros será igual al tiempo medido en μs multiplicado por 0.017 (mitad del valor de la velocidad). MATLAB da distancias máximas de 51 centímetros por el tipo de biblioteca de programación que se utiliza. Se puede decir que el tiempo máximo de pulso es de 30 μs . Los resultados de MATLAB son dados en metros, por lo tanto:

Distancia = $30\mu\text{s} \times 0.017 = 0.51\text{m} = 51\text{cm}$

Desarrollo

Escaneo de una superficie con un sensor de ultrasonido

Para la comunicación de Matlab con el sensor de ultrasonido, se debe cerciorar que está instalada la biblioteca JRodrigoTech/HCSR04. Se declara el objeto en Matlab de la siguiente manera:

- sensor = addon(a, 'JRodrigoTech/HCSR04', 'D12', 'D13')

Una vez hecho esto, se puede comenzar a trabajar con el sensor. Para calcular la distancia se debe aplicar la siguiente fórmula en el programa:

$$d = \frac{T * Vs}{2}$$

Donde:

d = distancia en metros

T = tiempo de pulso – eco

Vs = velocidad del sonido ($\frac{340m}{s}$)

El programa da como máximo 51 centímetros de distancia, esto se debe a la biblioteca Ultrasonic de Arduino; existe una variable en esta librería nombrada Time_out, la cual representa el tiempo de pulso-eco y está declarada con un valor de 3000. El tiempo que tarda en viajar el sonido 2 centímetros, es decir ida y vuelta, es 58 microsegundos (μs), y si se divide 3000 de la variable Time_out entre 58, se obtiene 51.72; esta es la razón por la que Matlab da como máximo distancias de 51 centímetros.

Para obtener datos de medición con el sensor de ultrasonido se usa la siguiente fórmula en el programa de Matlab:

$$\text{Distancia} = \text{readTravelTime}(\text{sensor}) * 340/2$$

Donde:

$$\text{readTravelTime}(\text{sensor}) = 3000/1000000$$

De esta manera se obtiene el tiempo en segundos; al multiplicar por 340 que es la velocidad del sonido, se obtiene la distancia recorrida de pulso y eco del sonido. Finalmente, se divide entre 2 porque se necesita conocer el valor de la distancia, al ser un recorrido de ida y vuelta se entiende que sólo se necesita la mitad del valor obtenido.

Se crea un ciclo en Matlab que va de 0 a 100 para obtener una distancia por cada 1.8 grados de escaneo. Una vez hecho el programa y montado el sensor sobre el motor de paso a paso, se puede llevar a cabo la medición de distancia; las mediciones servirán para saber si se puede reconstruir una superficie escaneada por el sensor, pero antes se debe hacer el modelo matemático de medición para poder interpretar los datos de medición obtenidos.

Modelo de medición para haz de ultrasonido

La siguiente sección desarrolla un marco de referencia para predecir los datos de medición del sensor de ultrasonido. La palabra objetivo sirve para referirse a cualquier característica ambiental capaz de ser observada por un sensor de ultrasonido. Las superficies de objetos reflejantes son consideradas objetivos espejo, los cuales producen retornos espejos, mientras que los objetos de difracción son objetivos de difusión y producen retornos difusos (John J. Leonard, 1992).

Un motor de paso a paso con un sensor ultrasónico montado en su rotor cambia el ángulo de exploración de 0 a π en pasos de 1.8 grados. La distancia máxima configurable del sensor es de 51.45 cm; esto significa que si no hay objetos en un círculo con radio de 51.45 cm y el centro en medio del rotor del motor, se obtiene sólo un círculo con un radio de 51.45 cm. Las mediciones se llevan a cabo como se muestra en las siguientes imágenes en la figura 2.

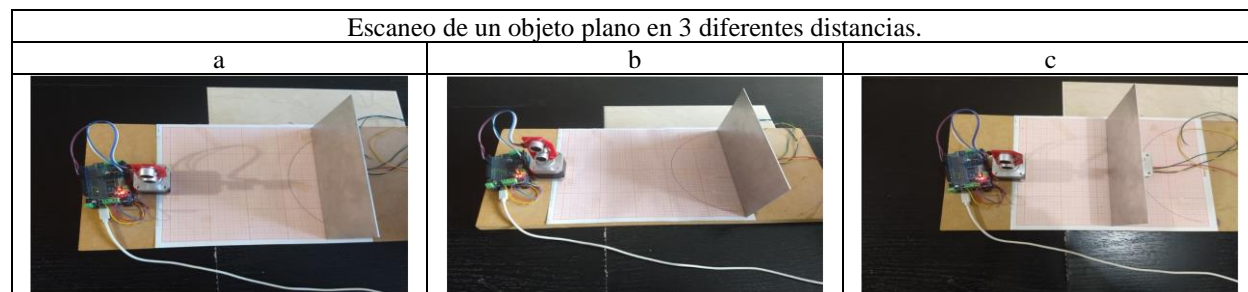


Figura 2. a) Escaneo de un objeto plano, primera distancia b) Escaneo de un objeto plano, segundo distancia c) Escaneo de un objeto plano, tercera distancia.

Las mediciones se realizan con tres diferentes distancias respecto al objeto. Cada medición se realiza por triplicado. Se toman las mediciones obtenidas en Matlab y las coordenadas se calculan en el programa Scilab de la siguiente manera (Kouroussis, 2012, Julio):

$$X(i) = Z(i, 2) * \cos(\%pi * Z(i, 1)/180)$$

$$Y(i) = Z(i, 2) * \sin(\%pi * Z(i, 1)/180)$$

Donde:

$Z(i, 2)$ = Distancia al objeto obtenida por el sensor.

$Z(i, 1)$ = Un ángulo de escaneo.

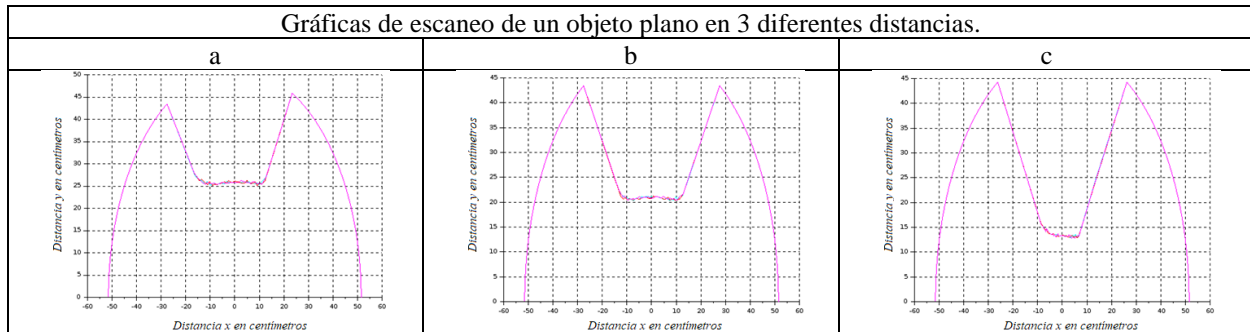


Figura 3. a) Gráfico de escaneo de un objeto plano, primera distancia b) Gráfico de escaneo de un objeto plano, segundo distancia c) Gráfico de escaneo de un objeto plano, tercera distancia.

Como se puede ver de la figura anterior, no se obtiene la línea recta que debería recibirse como resultado del escaneo de la figura plana.

Modelo de medición

El siguiente modelo que se muestra en la figura 4 presenta las siguientes limitaciones:

- Es bidimensional.
- La fuente y el receptor del sonido son puntuales y se encuentran en el mismo punto.
- La superficie de escaneo es plana.

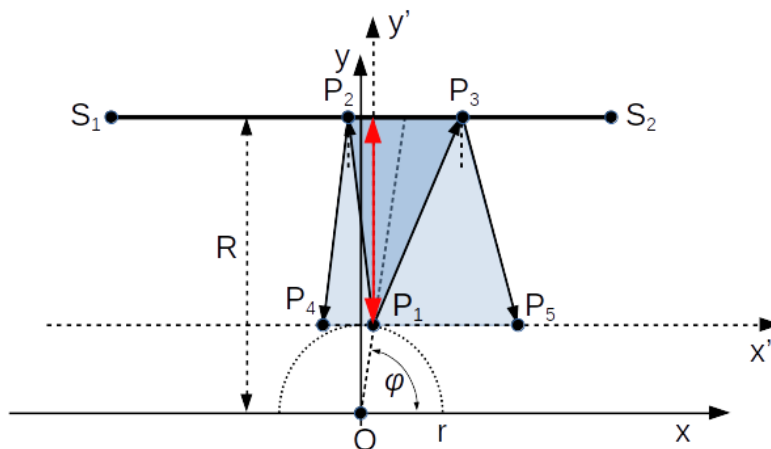


Figura 4. Simulación del escaneo, proyección del haz ultrasónico, desde su emisión hasta su reflexión.

El segmento $[S_1, S_2]$ es la proyección de la superficie a estudiar en el plano $Z = 0$. Un semicírculo con radio r es la trayectoria del sensor. P_1 es la posición instantánea del sensor. P_2 y P_3 los puntos de intersección de la superficie de prueba y los límites del haz de ultrasonido. θ es el ancho de haz. El modelo puede simplificarse enormemente si nos limitamos a escanear sólo superficies planas ubicadas paralelas al eje OX . Se puede ver en la figura anterior que el haz emitido por el transmisor sólo puede regresar al receptor cuando el receptor está posicionado de modo que su coordenada x se encuentre entre las coordenadas x de los puntos que delimitan el haz $x_{P_2} \leq x_{P_1} \leq x_{P_3}$. Sólo un rayo perpendicular a la superficie reflectante (rojo en la figura) que abandona el punto P_1 puede regresar al punto P_1 después de la reflexión. La figura anterior muestra que al escanear al intervalo del ángulo $0 \leq \phi \leq \pi$ se obtiene un número muy pequeño de puntos dentro del intervalo $[-r, r]$ a lo largo de la coordenada x .

Con base en la figura anterior, se construye la ecuación de una recta $y = a_1x + b_1$ que pasa por los puntos $S_1 = [x_{S_1}, y_{S_1}]$ y $S_2 = [x_{S_2}, y_{S_2}]$ (Foster, 1999).

$$a_1 = (y_{S_2} - y_{S_1}) / (x_{S_2} - x_{S_1})$$

$$b_1 = y_1 - a_1 x_{S1}$$

Se calcula la coordenada del punto P_1 (como se muestra en la figura 4).

$$P_1 = [x_{P1}, y_{P1}] = [r \cos(\phi), r \sin(\phi)]$$

Para el punto P_2 , se construye la ecuación de una recta $y = a_2(x - x_{P1}) + y_{P1}$ que pasa por el punto P_1 con el ángulo de inclinación $\phi_{Lb} = \phi + \theta/2$, donde θ es la mitad del ancho del haz del sensor.

Coefficiente angular $a_2 = \tan(\beta)$

Se calculan las coordenadas del punto P_2 , para hacer esto, se resuelve el sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{cases} a_1 x_{P2} - y_{P2} = -b_1 \\ a_2 x_{P2} - y_{P2} = a_2 x_{P1} - y_{P1} \end{cases}$$

Encontrados x y y son las coordenadas del punto $P_2 = [x_{P2}, y_{P2}]$. Para el punto P_3 , se construye la ecuación de una recta $y = a_3(x - x_{P1}) + y_{P1}$ que pasa por el punto P_1 con el ángulo de inclinación $\phi_{Rb} = \phi - \theta/2$.

Coefficiente angular $a_3 = \tan(\beta)$

Se calculan las coordenadas del punto P_3 , para hacer esto, se resuelve el sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{cases} a_1 x_{P3} - y_{P3} = -b_1 \\ a_3 x_{P3} - y_{P3} = a_3 x_{P1} - y_{P1} \end{cases}$$

Encontrados x y y , estos son las coordenadas del punto $P_3 = [x_{P3}, y_{P3}]$. La distancia a la superficie será igual a $D(\phi_i) = R - r \sin(\phi_i)$ en el caso que $x_{P2} \leq x_{P1} \leq x_{P3}$ o $D(\phi_i) = 51.45$ en otro caso.

El siguiente programa en Scilab, interpreta los datos del modelo y las mediciones en la siguiente manera:

```
if(Z(i,2) < 50)
X1(i)=r*cos(%pi*Z(i,1)/180)
Y1(i)=Z(i,2) +r*sin(%pi*Z(i,1)/180)
else
X1(i)=51.45*cos(%pi*Z(i,1)/180)
Y1(i)=51.45*sin(%pi*Z(i,1)/180)
end
```

Los datos de esta interpretación se presentan en la figura 5.

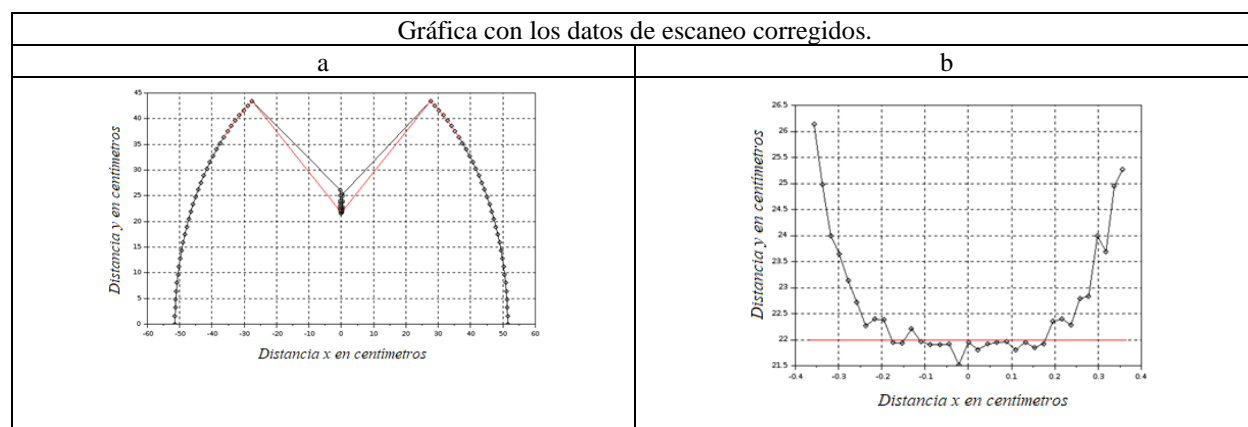


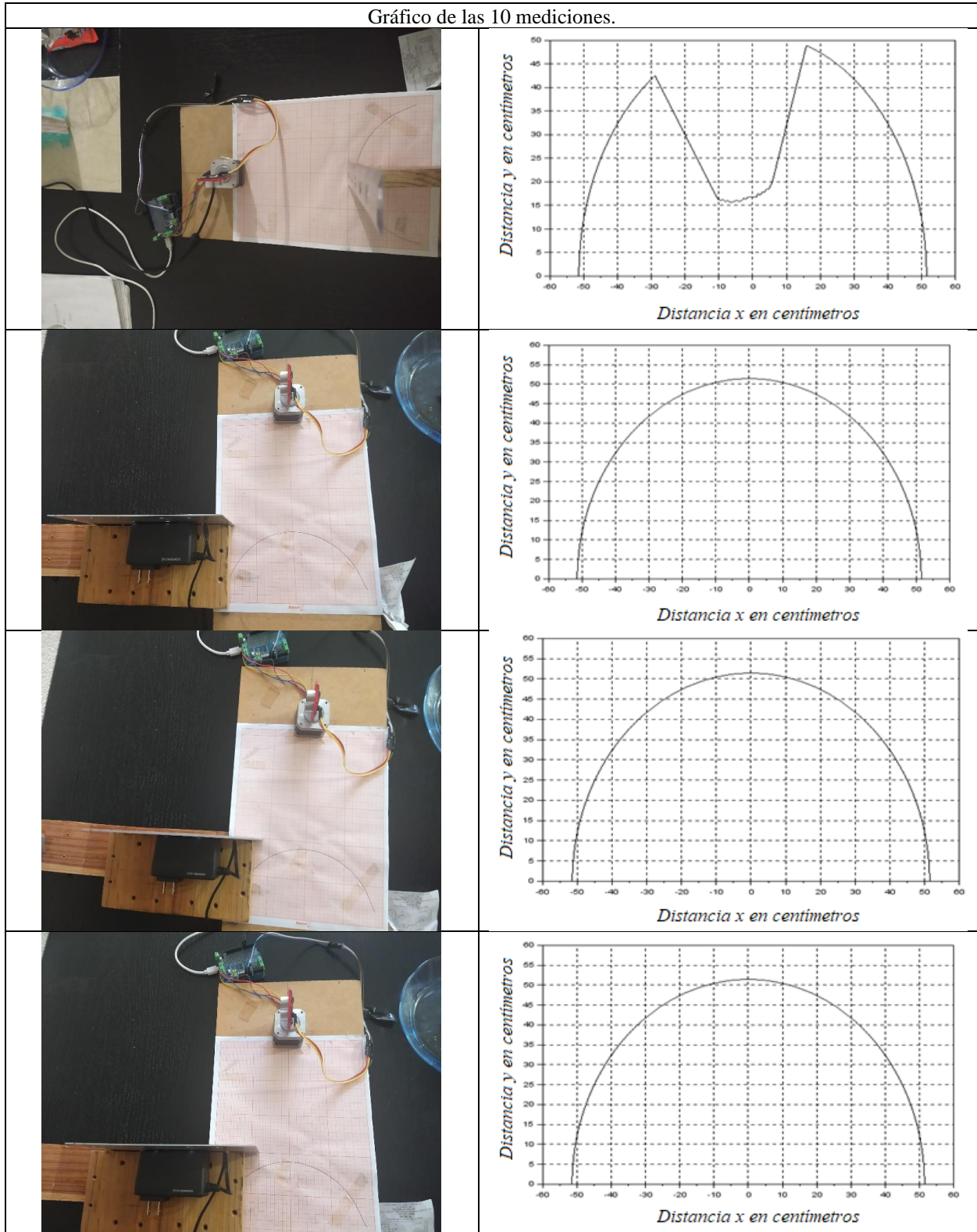
Figura 5. a) Gráfica que contiene sólo ángulos de escaneo en los que el receptor recibió una señal b) Resultados del modelo (línea roja) contra resultados de escaneo (línea negra) en Scilab.

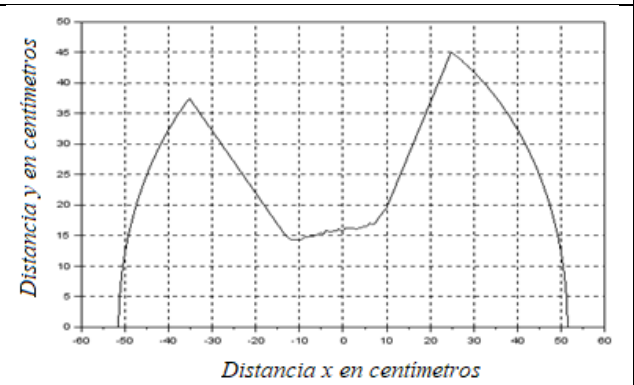
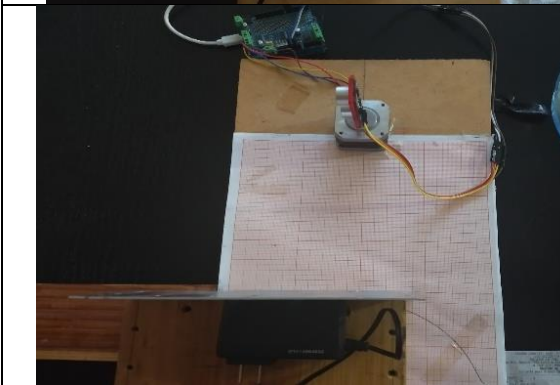
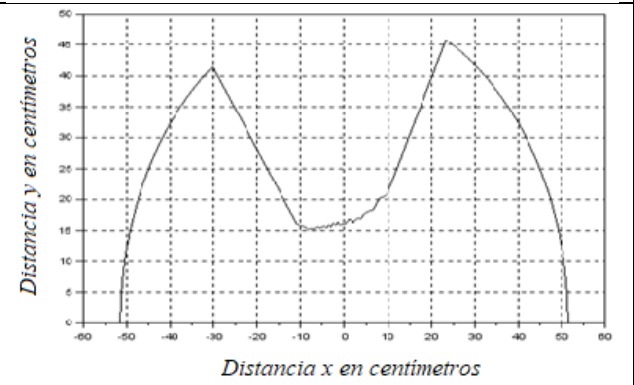
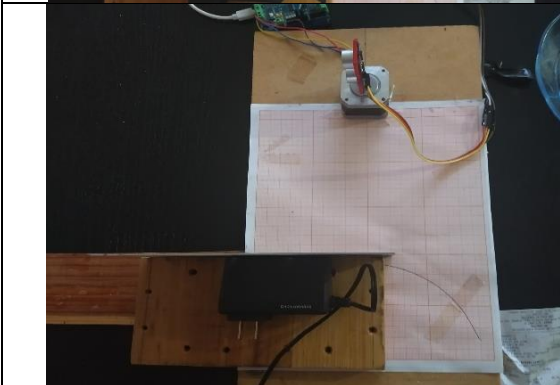
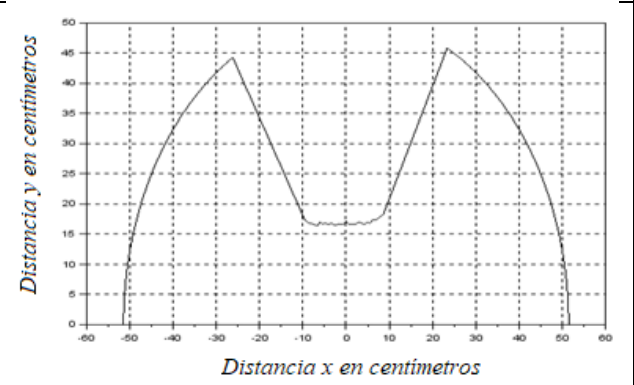
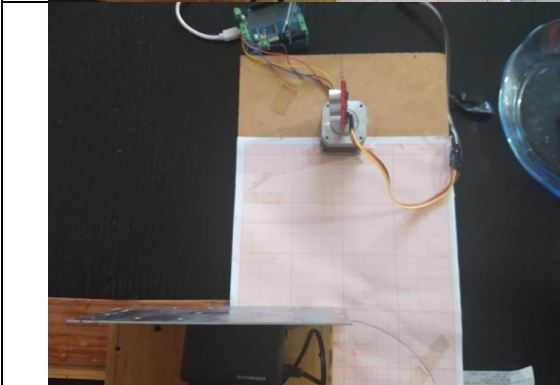
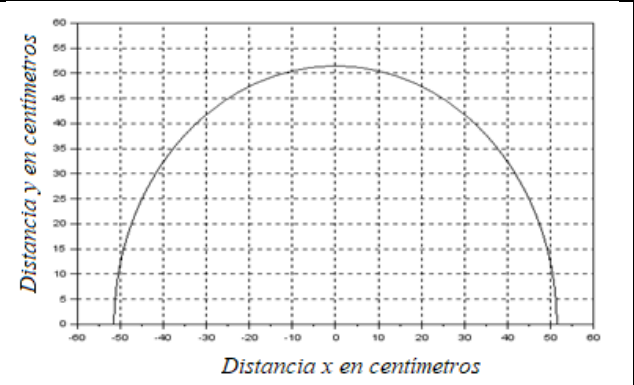
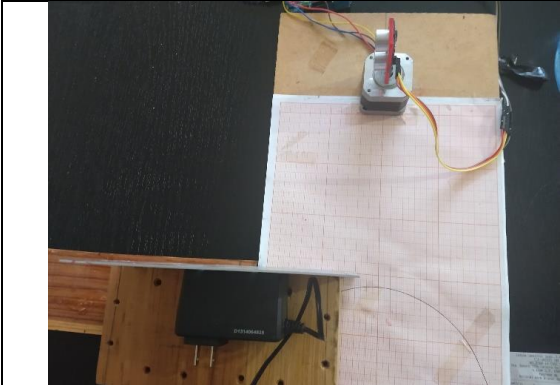
La figura muestra que los datos del modelo (línea roja) se restauran perfectamente. También se ve que la sección convexa en el centro de la figura desapareció (en los ángulos de escaneo cercanos a los 90 grados). Sin embargo, con esta interpretación de los productos de la medición, aparecen grandes errores en los bordes de la figura (en ángulos de escaneo extremos).

Pruebas y resultados

Del modelo de medición, se puede observar que sólo se pueden recibir datos cuando el objeto escaneado se encuentra cerca de los 90 grados de la trayectoria de escaneo, es decir el ángulo de incidencia es de 0 grados. Se puede ver en las siguientes 10 mediciones que lo predicho por el modelo de medición es verídico; los objetos en todas las mediciones se encuentran a 16 centímetros de distancia del sensor.

Gráfico de las 10 mediciones.





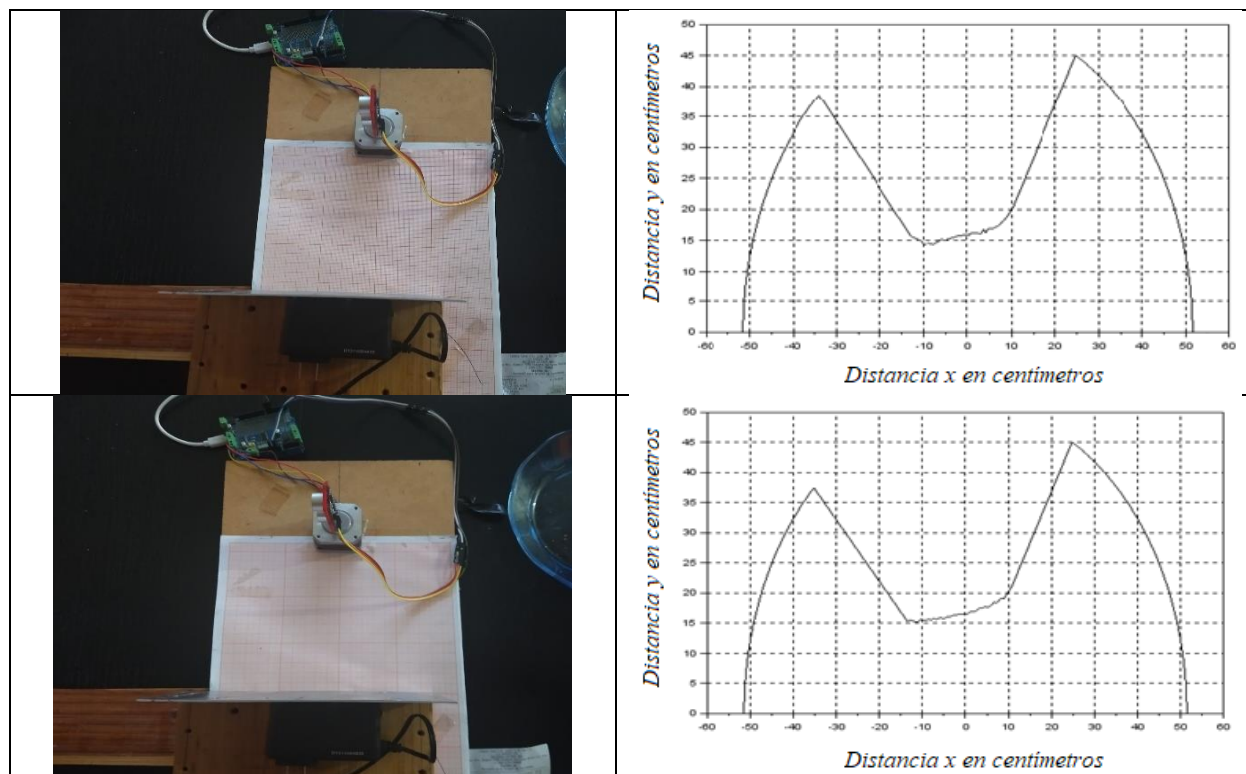


Figura 6. Objetos de escaneo y gráficos de medición respectivos.

De la figura 6 se puede ver que los escaneos dan como resultado un círculo con un radio de 51.45 centímetros como se plantea en el modelo de medición, esto debido a que el sensor no es capaz de detectar objetos si estos no tienen un ángulo de incidencia de 0 grados. El planteamiento de que el ángulo de incidencia y reflexión debe ser de 0 grados se comprueba en la figura anterior, donde se puede ver que los datos de medición obtenidos son bastante parecidos, esto debido a que los objetos se encuentran alineados a 90 grados en la trayectoria del plano de escaneo. En pocas palabras, no importa el tamaño del objeto, pues el sensor es capaz de detectar objetos únicamente cuando el ángulo de incidencia es de 0 grados, además que el sensor usado presenta una gran cantidad de errores en el momento de escanear, tal como se vio en la parte final del modelo de medición desarrollado.

Conclusiones

Usar ultrasonido como método de medición para poder reconstruir una superficie curva es algo muy complicado de hacer, el haz emitido debe ser ortogonal al eje del sensor sonar, de otro modo el sensor no es capaz de detectar la señal de eco para registrar alguna medición. El sonido sigue los principios físicos de reflexión, es decir, el ángulo de incidencia contra una pared o cualquier otro objeto será igual al ángulo de reflexión; de este trabajo se puede decir que únicamente cuando el ángulo de incidencia es de 0 grados, el ángulo de reflexión será de 0 grados igualmente, siendo esta la única condición para que el sensor de sonido reciba una medición precisa. Se pueden ver bastantes errores obtenidos en las lecturas de medición, si bien queda comprobado teórica y experimentalmente que el sensor deberá tener siempre una proyección ortogonal, este sensor en específico presenta muchos datos erróneos en comparación con el comportamiento ideal del sonido. No se puede llevar a cabo la ubicación de un punto exacto para después llevar a cabo una perforación con una broca o cualquier otro instrumento de corte.

La investigación se vio ampliamente afectada por el haz ultrasónico de tipo recto utilizado, pues los efectos de reflexión no permiten que los datos de medición vuelvan al sensor. Del modelo de medición de ultrasonido, se podrían obtener los distintos puntos de reflexión, encontrar la trayectoria de estos y ubicar sensores ultrasónicos en dichos puntos durante el escaneo de las figuras, y de esta manera se podrían recabar datos para reconstruir una figura plana e inclusive una figura curva. En ensayos no destructivos, se lleva a cabo la búsqueda de discontinuidades con sensores de haz angular, es decir, sensores que emiten un haz de ultrasonido con ciertos grados de inclinación, permitiendo que el haz choque con el objeto en un ángulo de incidencia que logre el retorno o el eco de vuelta al sensor y se pueda recabar la información. Los sensores angulares permiten la recopilación de datos en áreas de difícil acceso, y podrían

ser una opción para llevar a cabo el procedimiento de reconstrucción; la única condicionante sería el alto costo que estos representan, además de hacer los cálculos para elegir el sensor de haz angular que se requiera.

Otra alternativa sería construir un carril que permita al sensor moverse en direcciones que lo dejen en posición ortogonal, dejando que reciba los ecos necesarios para medir una superficie y reconstruir usando polinomios de interpolación. Esta última sería la opción más económica, sin embargo, siempre estará limitada al alcance y la forma que tenga el carril que de movimiento al sensor ultrasónico.

El ultrasonido es usado como fuente de medición en la industria manufacturera, y cualquier procedimiento que se quiera hacer necesita de los cálculos para definir la trayectoria del sonido, y de otro modo, la información que se reciba será incierta y desconocida. Por lo tanto, el método podrá ser muy efectivo siempre y cuando el interesado esté relacionado con los principios físicos que este conlleva.

Referencias

- Hellier, C. (2003). Ultrasonic Testing. In C. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation* (pp. 7.1 - 7.115). McGRAW-HILL.
- John J. Leonard, H. F.-W. (1992). A Sonar Sensor Model. . In H. F.-W. John J. Leonard, *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation* (pp. 13-50). Massachusetts Institute of Technology: Department of Engineering Science University of Oxford.
- Kouroussis, G. F. (2012, Julio). EasyMod: A MatLab/SciLab toolbox for teaching modal analysis. . In *19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV19)*, . Vilnius, Lithuania.
- Neubauer, W. G. ((1973)). Journal of Applied Physics,. In W. G. Neubauer, *Ultrasonic reflection of a bounded beam at Rayleigh and critical angles for a plane liquid-solid interface*. (pp. 44(1), 48-55.).
- Rimoldi, C. &. (2012). *Ensayo no Destructivo por método de ultrasonido. línea*]. Retrieved from [http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte% 20Ultrasonido, 20](http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido,20).