

Método para determinar el área de cobertura y resolución espacial de la cámara O3M en aplicaciones de monitoreo inteligente

Dr. Edward Blanco, director

Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación

Grupo ilumeyco, Av. Sabana Larga No.160, Reparto Oquet, Santiago, Rep. Dom.

Tel. 1 809 583 4255 ext. 206, e-mail: e.blanco@ilumeyco.com, <https://orcid.org/0000-0002-0585-0413>

Resumen. En este paper se presenta un método para determinar el área de cobertura de la cámara 3D de la serie O3M del fabricante alemán ifm electronic gmbh cuando esta es usada como elemento de monitoreo inteligente, vigilancia de áreas y/o supervisión de zonas. Se exponen los detalles a tomar en cuenta al momento de determinar el área de cobertura de la cámara, por ejemplo, a nivel del suelo, en función de su resolución, las características geométricas de la óptica y de los parámetros de altura y ángulo de inclinación de la misma. Como un resultado colateral de este análisis, también se presenta la forma de obtener la resolución espacial de dicha cobertura, con el fin de obtener el tamaño mínimo que debe tener un objeto para poder ser detectado. Se muestra el análisis geométrico y el código realizado en MATLAB, el cual puede ser reproducido fácilmente o interpretado para su realización, por ejemplo, en aplicaciones de hojas de cálculos como Excel o similar.

Palabras clave: 3D, ToF, campo de visión, resolución, proyección geométrica, visión computacional

1. Introducción

Siendo ifm electronic gmbh uno de los fabricantes de sensores y productos de automatización más grande e importante a nivel mundial, son pioneros al lanzar al mercado la cámara 3D (ToF, Time of Flight) a nivel industrial [1-2]. Se trata de la serie O3M compuesta principalmente por el conjunto: cámara ToF y módulo de iluminación infrarrojos (IR); para ser utilizada principalmente en aplicaciones de máquinas móviles (como elemento de detección de obstáculos y guiado autónomo) y como monitoreo inteligente de espacios y/o supervisión de área [3].

El conjunto O3M presenta gran robustez en materia de exposición a luces ambientales, oscuridad extrema, lluvias, neblinas y polvo, todo ello, gracias a su potente unidad de iluminación infrarrojos, permitiendo que la cámara pueda hacer su función de medir varios puntos del espacio a pesar de estar expuesta a condiciones adversas [4].

Cuando buscamos las especificaciones de la serie O3M, resulta que tenemos prácticamente el mismo dispositivo sensor PMD (Photonic Mixer Device) [5] con diferentes ópticas de la cámara 3D. Además de esto, la posibilidad de albergar una cámara 2D analógica para visualizar imágenes con mucho más resolución y color, ya que en el sensor PMD es muy costoso obtener grandes resoluciones en comparación con las típicas cámaras 2D.

Puesto que el conjunto O3M responde a un sistema autónomo, con bus de control, de comunicación y procesamiento interno, más que una cámara es un sensor, hábil para operar en el campo sin necesidad de computadores. Sin embargo, en este artículo podríamos intercambiar los términos, entre sensor y cámara, sabiendo siempre que nos referimos a la cámara 3D que tiene este conjunto.

En la Fig. 1 se muestra el conjunto O3M (con ambas cámaras) y la lámpara IR.

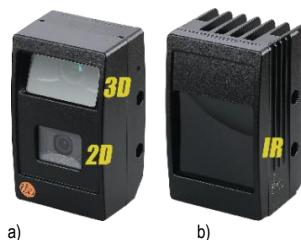


Fig. 1. Ejemplo de sistema O3M: a) Sensor O3M261, donde se muestra la cámara 3D y la 2D, b) lámpara infrarrojos (IR) O3M960.

La serie O3M1x1 se refiere al sensor sin cámara analógica, y la O3M2x1 cuando la posee; en este último caso, es posible colocar un monitor LCD que permite la visualización de las imágenes 2D, asociadas a las regiones de interés (ROI) u otras delimitaciones definidas en la cámara 3D, mostrando, por tanto, la escena en una especie de realidad aumentada (overlay) que el mismo sensor procesa, algo muy atractivo al momento de monitorizar espacios de manera inteligente [6].

La resolución del sensor PMD es, (WxH), de 64x16; es decir, que tiene 64 columnas de 16 píxeles (px) en todo el ancho del sensor, para una resolución espacial de $N_p=1,024$ pxs. Esto implica, que se mide distancia en 1,024 puntos de todo el espacio de cobertura que la lente pueda estar mirando. En tal sentido, si se tiene una lente más enfocada (angularmente más cerrada), se tiene mayor resolución espacial y menos cobertura, y lo contrario cuando la óptica es más abierta, si mantenemos la misma distancia al objeto en ambos casos. Así, la óptica es identificada con la nomenclatura O3Mxy1, donde $y=5, 6, 7$. Por ejemplo, el modelo O3M261 es un sensor que incluye la cámara 2D ($x=2$) con una apertura angular de la lente de $95^\circ \times 32^\circ$ ya que $y=6$ [7].

En visión computacional, existe un proceso fundamental y ampliamente estudiado, cuando por medio de una cámara deseamos representar el mundo real que se observa, desde el punto de vista de la precisión de las mediciones y cuantificación del tamaño de los objetos, lo que se conoce como: calibración de cámara [8]. En caso de cámaras 2D, se traduce un punto del espacio (x,y,z) en un punto del plano imagen (u,v) por medio de la proyección geométrica principalmente en el modelo pin-hole y el uso de imágenes con patrones conocidos [8].

El proceso de calibración, por lo general es un algoritmo recursivo, y la calibración de la cámara 3D de este sensor O3M no es la excepción [9], pudiéndose llevar a cabo en los primeros pasos al momento de configurarlo por medio del software de parametrización Vision Assistant del mismo fabricante [10]. Para hacer que este algoritmo converja rápido, se debe tratar de colocar tanto la altura del sensor, como el ángulo de inclinación lo más parecido al que será utilizado en la práctica, además de que el campo de visión esté despejado.

Dependiendo de la aplicación, pero casi siempre en monitoreo inteligente, el sensor debe estar ligeramente observando parte del suelo (esto sirve como patrón de calibración). Una vez que el proceso de calibración haya terminado, ya tendríamos tanto el ángulo como la altura calculada, con la que podemos trabajar [11].

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección dos se describe el método propuesto, en la tres se encuentra los resultados experimentales, la cuarta habla de la discusión y finalmente en la quinta, se exponen las principales conclusiones.

2. Método propuesto

El método propuesto parte del supuesto, de que el sensor O3M será utilizado en una tarea de monitoreo de espacios, una vez llevado a cabo el proceso de calibración antes mencionado. En tal caso, tanto el ángulo de inclinación como la altura del sensor, como resultado de la calibración, se tomarán como parámetros para la determinación, tanto el área de cobertura o campo de visión y la resolución de dicha área.

En todo sistema de visión computacional, sabemos que a medida que la distancia operativa va incrementando, el plano de cobertura o campo de visión aumenta, tal como se muestra en la siguiente figura para el sensor O3M [12]. Sin embargo, igualmente la resolución disminuye ya que se tiene la misma cantidad de píxeles para cada vez más área de cobertura.

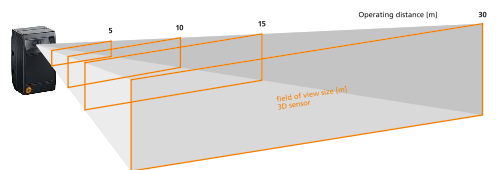


Fig. 2. Proyección del plano de cobertura en el espacio según la distancia del objeto (distancia operativa) del sensor O3M.

Según la figura anterior, para este tipo de proyección geométrica, cuyo plano cubierto en el espacio (rectángulo), a una distancia dada, está en paralelo al plano imagen del PMD, es muy fácil calcular el área de cobertura, además de obtener la resolución efectiva de la misma. Sin embargo, en la vida real, donde en la mayoría de aplicaciones la

cámara lleva cierto ángulo mirando hacia el suelo, es necesario contar con un método que permita obtener el área de cobertura real proyectada. En estos casos, donde el ángulo de inclinación de la cámara es diferente a 90° , la forma del campo de visión o área de cobertura proyectada en el suelo es un trapecio y no un rectángulo como vimos en la Fig. 2. En tal caso, se convierte en un problema simple de geometría, pero que, con ayuda del computador, el diseñador del sistema de monitoreo inteligente, rápidamente puede definir sus umbrales en todo el espacio y saber cuál es el tamaño mínimo de los objetos a detectar.

2.1- Análisis del plano (z, y) - alcance

En la Fig. 3 se muestra el modelado geométrico utilizado para determinar la cobertura de la cámara O3M, en función de sus ángulos de apertura en ambos ejes, y la posición del mismo en el espacio dada por los parámetros: 1) altura del sensor (h), b) ángulo de inclinación del sensor, alpha (α). El ángulo de apertura vertical es γ (gamma) y el horizontal θ (theta), ambos dados en las hojas de especificaciones. En el diagrama puede verse, que (d_i) representa la distancia de detección mínima desde el sensor, y (d_s) la máxima. La cobertura en este eje de profundidad (z), es dada por $D_z = (d_s - d_i)$, la cual se hace más grande a medida que el ángulo de inclinación es menor; incluso, si el ángulo α llega a ser $\gamma/2$, la cobertura D_z se hace teóricamente infinita.

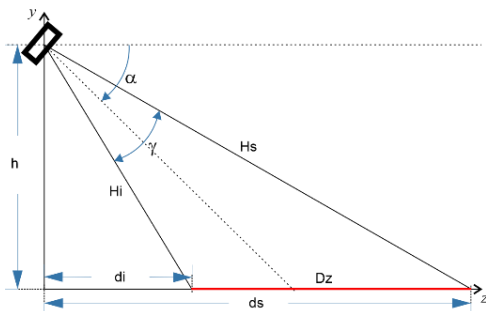


Fig. 3. Proyección de la cobertura en el eje z del sensor O3M con ángulo de apertura vertical γ , altura h y ángulo de inclinación α .

Tomando en cuenta el principio de ángulos semejantes, para obtener las distancias de cobertura en el eje z , podemos reducir el modelo geométrico anterior al de la figura 4.

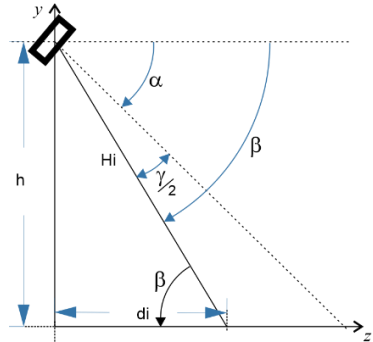


Fig. 4. Ángulos semejantes en la obtención de la hipotenusa inferior H_i .

Tomando en cuenta el diagrama de la Fig. 4, y suponiendo que la hipotenusa inferior (H_i) está alineada al eje y , visto desde el eje x , se tiene que:

$$h = H_i \cdot \sin(\beta) \quad (1)$$

siendo $\beta = \alpha + \gamma/2$, por tanto:

$$H_i = h / \sin(\beta) \quad (2)$$

Lo que implica que,

$$d_i = H_i \cdot \cos(\beta) = h / \tan(\beta) \quad (3)$$

De manera similar, la hipotenusa superior (H_s) de la Fig. 3 se obtiene como:

$$H_s = h / \sin(\rho) \quad (4)$$

y la distancia máxima,

$$d_s = h / \tan(\rho) \quad (5)$$

donde $\rho = \alpha - \gamma/2$.

De (3) y (5) resulta la ecuación que determina la cobertura del sensor en el eje z , D_z , cual queda dada por:

$$D_z = (d_s - d_i) \quad (6)$$

2.2- Análisis del plano (x, y) - anchura

Puesto que la hipotenusa inferior, H_i , está alineada con el eje y , si la observamos en el plano (x, y), esta se convierte en la bisectriz del ángulo de apertura horizontal, implicando que ahora hay dos proyecciones a cada lado. Ambas proyecciones representan la cobertura horizontal en el eje x , desde el punto más cercano al sensor rozando el

suelo, si se mira desde el plano (z, y) . Lo dicho anteriormente, puede observarse en la Fig. 5.

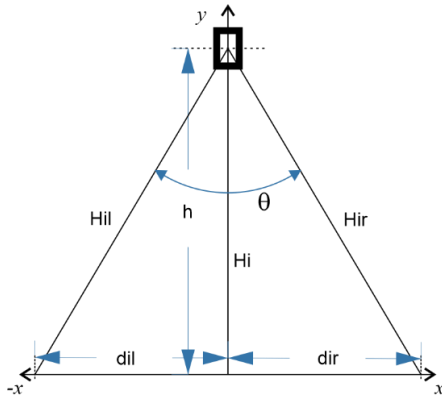


Fig. 5. Modelo geométrico visto en el plano (x, y) para la hipotenusa inferior (H_i) dada el análisis anterior. Se observa a θ como ángulo de apertura horizontal.

De tal forma, que para obtener la cobertura en el eje x , se tiene que:

$$dil = H_i \cdot \tan(-\theta/2) \quad (7)$$

de igual forma,

$$dir = H_i \cdot \tan(\theta/2) \quad (8)$$

quedando la cobertura en el eje x , desde la proyección más baja en el eje z , de la siguiente forma:

$$Spanix = (dir - dil) \quad (9)$$

Este valor se interpreta, como el rango que el sensor puede detectar objetos desde su centro hacia la izquierda y derecha a la distancia mínima de detección (d_i), asociada a la hipotenusa inferior.

El párrafo anterior indica pues, que este valor horizontal, será mucho mayor si es obtenido por medio de la hipotenusa superior, implicando entonces la formación de un trapecio a nivel del suelo. El área de este trapecio representa el área de cobertura de nuestro sensor colocado con los parámetros antes establecidos.

Por tanto, si obtenemos la cobertura en el eje x , para la proyección más lejana al sensor, es decir utilizando la hipotenusa superior (H_s), se tiene lo siguiente:

$$Spanxs = (dsr - dsl) \quad (10)$$

siendo,

$$dsl = H_s \cdot \tan(-\theta/2),$$

$$dsr = H_s \cdot \tan(\theta/2)$$

El valor de $Spanix$ representa el ancho máximo de cobertura en la parte más baja de la proyección y $Spanxs$ el ancho en la parte más alta de la proyección, por tanto, la mayor capacidad de recorrido horizontal que tiene la proyección del sensor bajo las condiciones establecidas.

Finalmente, usando (6), (9) y (10), el área de cobertura a nivel del suelo, del sensor con altura y ángulo de giro determinado, queda dada por el área del trapecio, de la siguiente forma:

$$AC = Dz \cdot (Spanix + Spanxs) / 2 \quad (11)$$

2.3- Análisis de resolución espacial (RE)

Como vimos en el párrafo introductorio de esta sección, la resolución espacial se puede obtener considerando que el plano de cobertura está totalmente en paralelo con el plano imagen del sensor (caso muy ideal). Por ejemplo, para el caso del sensor O3M261 [13], a una distancia operativa (d_o) de 5m (metros) se tiene un área de cobertura, $ACr=W \times H$, de 11×2.9 (m), por lo que la resolución espacial puede aproximarse por medio del área del rectángulo, (REr), como:

$$REr \approx \frac{ACr}{N_p} = \frac{11 \times 2.9}{1024} = 0.0311m^2$$

Tanto esta resolución y la misma área de cobertura, son aproximaciones, además de estar condicionadas especialmente al caso cuando el plano de cobertura (a la distancia operativa) está en paralelo con el plano imagen del sensor PMD. Es decir que, a esa distancia de 5 metros, el objeto a medir no puede tener un área menor a $0.0311m^2$ ($311cm^2$) ya que posiblemente no se logre detectar cuando se desplace de un punto a otro en la zona cubierta.

Un ejemplo de este caso sería, si en el análisis anterior 2.1 fijamos al sensor a una altura de 5m mirando hacia abajo, es decir con un ángulo de giro, $\alpha = 90^\circ$, quedando el plano del suelo como el campo de visión o área de cobertura, tal como se muestra en la Fig. 6. También son mostradas, las

proyecciones de cada fila de píxeles que dividen al ángulo de apertura vertical γ , formando (H-1) subdivisiones angulares.

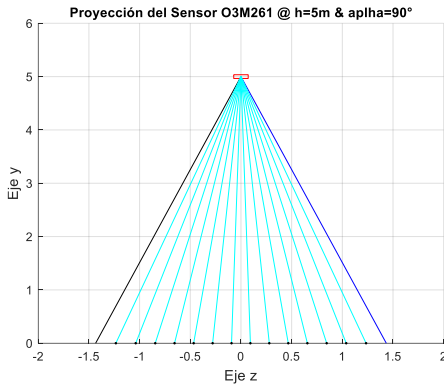


Fig. 6. Proyección de cada subdivisión angular tocando el plano del suelo, para $h=5\text{m}$ y $\alpha=90^\circ$. Los desplazamientos en z de las subdivisiones (espacio entre los puntos negros), puede notarse que son muy parecidos para esta posición de la cámara.

El caso anterior, es más bien un caso ideal, por lo que debemos buscar un método para obtener la resolución espacial para cuando $\alpha \neq 90^\circ$. Cuando es así, se tiene que las proyecciones de profundidad hasta el suelo son diferentes, ya vimos que $H_i \neq H_s$ en la Fig. 3. En la siguiente figura se pueden ver las diferentes proyecciones angulares, y se muestra la diferencia entre los desplazamientos en z a nivel del suelo entre cada par de proyección. Se puede observar, cómo a medida que el ángulo disminuye, el diferencial z aumenta.

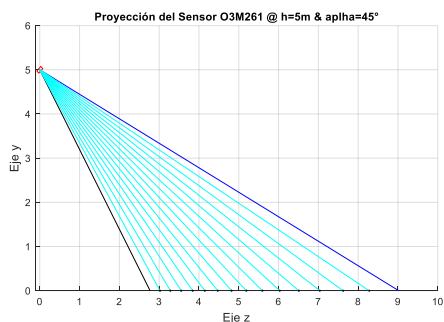


Fig. 7. Proyección de cada subdivisión angular en el eje z (plano del suelo) para una altura $h=5\text{m}$ y $\alpha=45^\circ$ (aquí ya no hay una distancia operativa). Cada proyección tiene su propia distancia respecto de la cámara. Se tiene a d_i como distancia operativa mínima y d_s como máxima. Puede notarse que el diferencial de desplazamiento en z (espacios entre los puntos negros) va incrementando de izquierda a derecha.

Visto el análisis anterior y considerando el efecto similar en el eje x , la forma de los cruces de las subdivisiones en ambos ejes (x, z) forman cuadriláteros en todo el plano, donde cada vértice es un píxel del plano imagen. Es lógico pensar entonces, que el área de cada cuadrilátero va incrementando a medida que estos se alejan del eje axial en el centro del plano imagen.

Finalmente, la manera de obtener la resolución de la cobertura para un campo de visión con forma trapezoidal, usando (11) es la siguiente:

$$RE = \frac{AC}{N_p} \quad (12)$$

Esta es una mejor aproximación, puesto que contempla cualquier ángulo de giro de la cámara.

Con este análisis, hasta aquí ya sabemos el área mínima en el plano (x, z) que debe tener nuestro objeto, sin embargo, puesto que la forma de cada cuadrilátero es trapezoidal, producto del efecto en las proyecciones antes mencionadas, es posible tener aristas con valores elevados, principalmente cuando las proyecciones se alejan del eje axial del PMD, por lo que se hace necesario un método que obtenga los valores mínimos que debe tener el objeto a detectar en los ejes (x, z). De ahí, el siguiente análisis.

2.3.1- Límite en profundidad (z)

Puesto que el sensor PMD tiene H píxeles en vertical, se cubren (H-1) subdivisiones angulares, por tanto, el diferencial de ángulo o resolución angular vertical es:

$$\Delta\gamma = \gamma / (H - 1) \quad (13)$$

Ya hemos visto como el desplazamiento a nivel del suelo (eje z) que produce cada diferencial de ángulo, es mayor a medida que el mismo se acerca al límite de la distancia máxima de detección (d_s) (el ángulo es cada vez más inclinado). Este es un efecto no-lineal. Por tanto, puesto que se desea obtener la resolución mínima, se debe contemplar la porción de desplazamiento en z a nivel del suelo, dada por el Δz más cercano al eje de proyección mayor, es decir H_s , el cual resulta ser el desplazamiento máximo. Por tanto, usando (5) el límite de resolución de profundidad viene dado por,

$$Lz = \Delta z(max) = ds - dzs \quad (14)$$

por tanto,

$$dzs = h/\tan(\alpha - \gamma/2 + \Delta\gamma), \text{ y con (13),}$$

$$dzs = h/\tan\left(\alpha + \gamma \frac{3(1-H/3)}{2(H-1)}\right) \quad (15)$$

2.3.2- Límite en horizontal (x)

Similar al análisis anterior, el sensor PMD tiene W píxeles en horizontal, implicando un diferencial de ángulo horizontal de:

$$\Delta\theta = \theta/(W - 1) \quad (16)$$

Puesto que debemos obtener, el máximo desplazamiento en el eje x , se deben tomar en cuenta las proyecciones laterales dadas por las proyecciones más lejanas en el eje z , es decir, las proyecciones dadas por la hipotenusa superior Hs , lo más alejadas al eje y a cualquiera de ambos lados. Tomando el lado derecho ($\theta/2$), puede demostrarse que el límite de resolución horizontal es,

$$Lx = \Delta x(max) = dsr - dxsr \quad (17)$$

donde $dxsr = Hs \cdot \tan(\theta/2 - \Delta\theta)$, que con (16) queda,

$$dxsr = Hs \cdot \tan\left(\frac{\theta(W-3)}{2(W-1)}\right) \quad (18)$$

Este análisis culmina, en tener un valor del área de cobertura del trapecio formado por el campo de visión, los límites de alcance para que el objeto pueda detectarse, el área mínima del objeto para que éste pueda ser detectado y el tamaño mínimo de los lados (en los ejes x, y) del objeto para que su detección no presente problemas en los puntos de menos resolución del área de cobertura:

- A) Área de cobertura: AC
- B) Alcance de detección: di, ds
- C) Límites de área de cobertura: Dz, Spanix, Spansx
- D) Resolución espacial: RE
- E) Límites del tamaño del objeto: Lz, Lx

3. Resultados experimentales

3.1 Script

A continuación, se presenta el código m de la implementación del algoritmo. En caso, de que el lector no cuente con la herramienta de Matlab, perfectamente puede interpretar el código y hacer las diferentes funciones en algún software de hojas de cálculo al estilo Excel de MS. Este ejemplo se ha realizado usando los datos del modelo O3M261, cuyos ángulos de apertura de la lente son $95 \times 32^\circ$. La parametrización de este ejemplo, consta de fijar la altura del sensor, $h=5m$, y el ángulo de giro, $\alpha=25^\circ$. En este script no se muestra el código de simulación geométrica ni de despliegue de las variables.

```

%-----
%-- Análisis de cobertura del sensor O3M --
%-----
%--- Datos del sensor
H=16; % (px) resolución vertical PMD
W=64; % (px) resolución horizontal PMD
gamma=32; % (°) ángulo de apertura vertical O3M261
theta=95; % (°) ángulo de apertura horizontal
O3M261
%--- parámetros
h=5; % (m) altura del sensor
alpha=25; % (°) ángulo de giro del sensor
%-----
%--- Análisis del plano (z,y)
%-----
beta=alpha+gamma/2;
%--- Hipotenusa inferior (Hi)
Hi=h/sin(beta*pi/180);
%--- pi/180 ==> conv. grados a radianes
%--- Distancia mínima (di)
di=h/tan(beta*pi/180);
%---
rho=alpha-gamma/2;
%--- Hipotenusa superior (Hs)
Hs=h/sin(rho*pi/180);
%--- Distancia máxima (ds)
ds=h/tan(rho*pi/180);
%--- Span en el eje z
Dz=ds-di;
%-----
%--- Análisis del plano (x,y)
%-----
%--- (Hi) Desplaz. izquierda desde el centro
dil=Hi*tan(-theta*pi/360);
%--- (Hi) Desplaz. derecha desde el centro
dir=Hi*tan(theta*pi/360);
%--- Span x en la hipotenusa inferior (Hi)
Spanix=dir-dil;
%--- (Hs) Desplaz. izquierda desde el centro
dsl=Hs*tan(-theta*pi/360);
%--- (Hs) Desplaz. derecha desde el centro
dsr=Hs*tan(theta*pi/360);
%--- Span x en la hipotenusa superior (Hs)
Spansx=dsr-dsl;
%-----
%--- Área de cobertura (área del trapecio)
%-----
AC=Dz*(Spanix+Spansx)/2;
%-----
%--- Análisis de resolución espacial ---
%-----
%--- Resolución Espacial
Np=W*H; %--- Número de pixeles
RE=AC/Np;

```

```

%--- Resolución de profundidad (z)
Dgam=gamma/(H-1);
dzs=h*tan((pi/180)*(alpha+gamma*(3/2)*(1-H/3)/(H-1)));
Lz=ds-dzs;
%--- Resolución en horizontal (x)
Dthe=theta/(W-1);
dxsr=Hs*tan((pi/180)*(theta/2)*((W-3)/(W-1)));
Lx=dsr-dxsr;

```

3.2. Prueba A: Campo de visión rectangular

En esta prueba se tomó el script descrito más arriba y se fijaron los valores, tal que: $h=5\text{m}$ y $\alpha=90^\circ$. Los resultados de esta prueba ponen de manifiesto el uso de nuestro modelado, para el caso ideal, donde el plano del campo de visión está en paralelo con el plano imagen del sensor PMD. Este sería el caso de la Fig. 2 y Fig. 6. A continuación se muestran las imágenes de las proyecciones geométricas del sensor, una vez llevada a cabo la simulación de graficado, basada en el script antes mencionado.

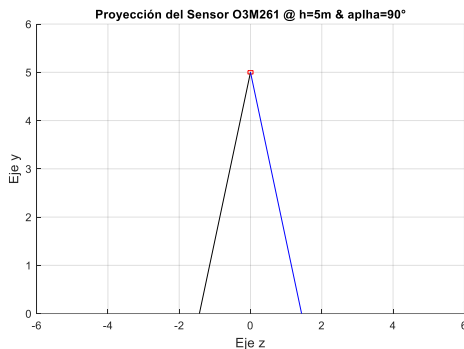


Fig. 8. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (z, y) : $\gamma=32^\circ$. Dz representa la distancia entre las dos proyecciones cortado el eje z.

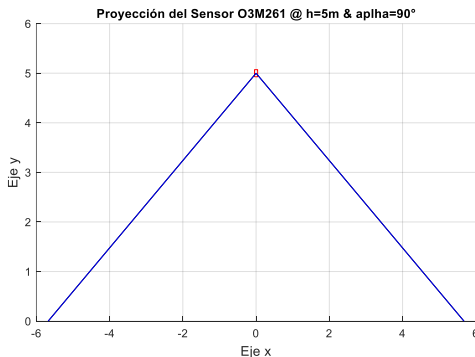


Fig. 9. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (x, y) : $\theta=95^\circ$. La cobertura en el eje x en ambas hipotenusas del eje z son similares: $\text{Spanix}=\text{Spanix}$.

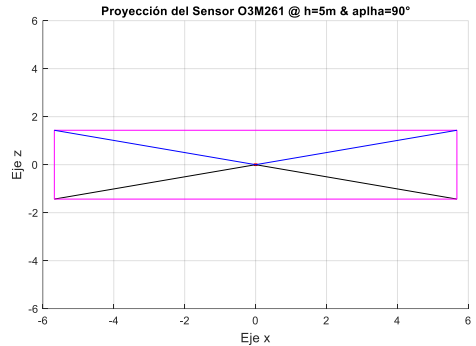


Fig. 10. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (z, x) : $\gamma=32^\circ$, $\theta=95^\circ$. El rectángulo (magenta) representa el área de cobertura.

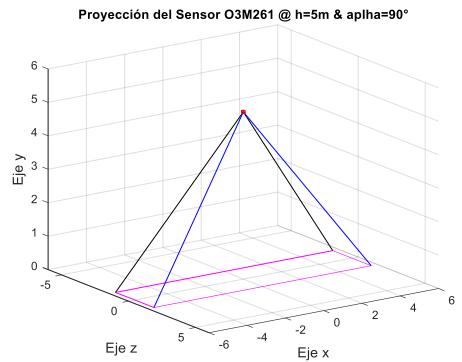


Fig. 11. Proyección del campo de visión del sensor en 3D. Espacio (x, y, z) : $\gamma=32^\circ$, $\theta=95^\circ$. El rectángulo en el suelo (magenta) representa el área de cobertura.

A continuación, se muestra la salida del script con dichos parámetros por medio de la visualización de las variables:

```

-----
Script output: cobertura y resolución sensor O3M
-----
- Datos: Res. vertical (H) = 16 (px)
- Datos: Res. horizontal (W) = 64 (px)
- Datos: gamma = 32 (°)
- Datos: theta = 95 (°)
-----
- Param: Altura del sensor (h) = 5 (m)
- Param: Ángulo de inclinación (alpha) = 90 (°)
-----
- Distancia mínima de detección: di = -1.4337 (m)
- Distancia máxima de detección: ds = 1.4337 (m)
-----
- Cobertura z (profundidad): Dz = 2.8675 (m)
- Cobertura x (ancho inferior): Spanix = 11.3529 (m)
- Cobertura x (ancho superior): Spansx = 11.3529 (m)
-----
- Área de Cobertura: AC = 32.5538 (m^2)
-----
- Resolución Espacial: RE = 0.031791 (m^2)
-----
- Límite en z: Lz = 0.19944 (m)
- Límite en x: Lx = 0.29162 (m)
K>>

```

En este despliegue de resultados, puede verse que los valores del área de cobertura y resolución espacial son muy parecidos a los obtenidos con los datos del fabricante en este caso ideal, vistos en la introducción de la sección anterior (2.3) ya que el script ha sido evaluado con los mismos parámetros, resultando $AC=32.55m^2$ vs $ACr=31.9m^2$. Existe una ligera diferencia ya que, el caso ideal dado por el fabricante calcula el área de cobertura tomando en cuenta sólo las proyecciones, en ambos ejes, que pasan por el centro del plano, formando un rectángulo. En nuestro caso, se forman varios trapecios debido a que también estamos usando las proyecciones más alejadas al eje axial (las cuales representan las 4 esquinas del polígono resultante). Por esa razón AC es ligeramente mayor que ACr. De igual forma pasa con la resolución: $RE=0.317m^2$ vs $REr=0.0311m^2$.

3.3. Prueba B: Campo de visión trapezoidal

Para esta prueba se fijaron los valores, tal que: $h=5m$ y $\alpha=30^\circ$. Puesto que se trata de la misma altura (h) del ejemplo anterior, podemos hacer una comparativa sobre los nuevos valores. Este caso es más real, propio de la mayoría de las aplicaciones.

A continuación, se muestran las proyecciones:

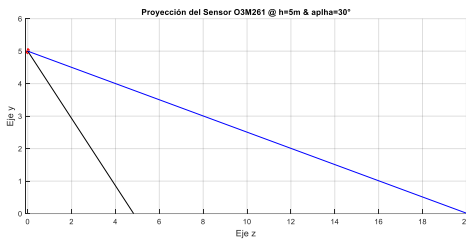


Fig. 12. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (z, y): $\gamma=32^\circ$. Parámetros: $h=5m$, $\alpha=30^\circ$. Se muestra la hipotenusa inferior (negro) y superior (azul).

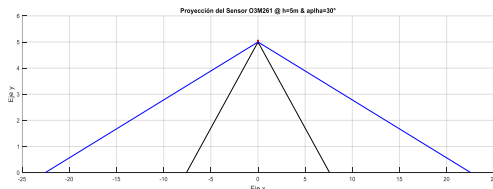


Fig. 13. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (x, y): $\theta=95^\circ$. Parámetros: $h=5m$, $\alpha=30^\circ$. Se muestra la hipotenusa inferior (negro) y superior (azul).

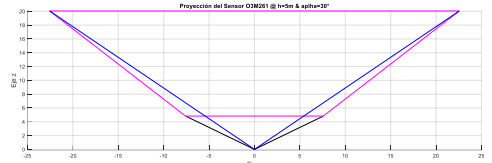


Fig. 14. Proyección del campo de visión del sensor, visto desde el plano (x, z): $\gamma=32^\circ$, $\theta=95^\circ$. Parámetros: $h=5m$, $\alpha=30^\circ$. Se muestra la hipotenusa inferior (negro) y superior (azul). El trapecio (magenta) representa el área de cobertura.

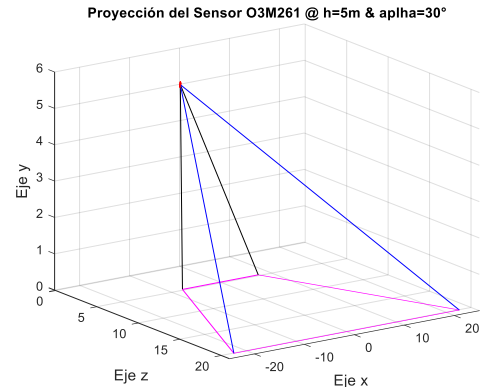


Fig. 15. Proyección del campo de visión del sensor en 3D. Espacio (x, y, z): $\gamma=32^\circ$, $\theta=95^\circ$. El trapecio en el suelo (magenta) representa el área de cobertura.

A continuación, se muestra la salida del script con los nuevos parámetros. Se puede observar cómo, a pesar de que el sensor está a la misma altura, con la nueva inclinación, el área de cobertura crece significativamente de $32.5m^2$ a $459.9m^2$. Sin embargo, en la misma proporción, la resolución espacial disminuye, es decir, aumenta de valor, tal que, de $0.0317m^2$ pasa a ser $0.448m^2$. Igual pasa con los límites que acotan el tamaño del objeto a detectar, en este caso, el objeto no debería tener una dimensión en z menor de $2.76m$, y en x de $1.15m$. Evidentemente, estos límites se deben tomar en cuenta en los extremos donde se dilatan las proyecciones, es decir, en los puntos más lejanos al sensor en z , y en los puntos más extremos en el eje x .

4. Discusión

Como se pudo observar, este incremento del área de cobertura es propio de las no-linealidades inherentes del modelo geométrico, por lo que se debe tener cuidado de no abusar con el ángulo de inclinación. Ello es así, ya que el aumento del área

de cobertura puede entenderse como una ventaja, sin embargo, ya hemos visto que la resolución espacial disminuye en la misma proporción, lo que puede condicionar la aplicación de este sistema de cámaras según el tamaño del objeto a detectar.

```
-----  
Script output: cobertura y resolución sensor O3M  
-----  
- Datos: Res. vertical (H) = 16 (px)  
- Datos: Res. horizontal (W) = 64 (px)  
- Datos: gamma = 32(°)  
- Datos: theta = 95(°)  
-----  
- Param: Altura del sensor (h) = 5(m)  
- Param: Ángulo de inclinación (alpha) = 30(°)  
-----  
- Distancia mínima de detección: di = 4.8284 (m)  
- Distancia máxima de detección: ds = 20.0539 (m)  
-----  
- Cobertura z (profundidad): Dz = 15.2255 (m)  
- Cobertura x (ancho inferior): Spanix = 15.171 (m)  
- Cobertura x (ancho superior): Spansx = 45.11 (m)  
-----  
- Área de Cobertura: AC = 458.9024 (m^2)  
-----  
- Resolución Espacial: RE = 0.44815 (m^2)  
-----  
- Límite en z: Lz = 2.7687 (m)  
- Límite en x: Lx = 1.1587 (m)  
K>>
```

Otro detalle a tomar en cuenta es que, así como crece el área de cobertura al disminuir el ángulo de inclinación, las proyecciones de mayor longitud pueden superar el rango máximo de medición del sensor (alcance de cada pixel), lo que puede producir puntos ciegos en la detección del objeto (35m aprox.). Es decir, la mayor proyección, dada por la longitud de la hipotenusa superior (azul en la Fig. 12), no debe ser mayor al rango máximo de medición que se especifica, según las condiciones de utilización y los tamaños del objeto dados en [13].

En el documento "Instructions for set-up O3M Area surveillance ZZ1103" se muestran varios casos de valores de áreas de coberturas en función de diferentes ángulos y alturas del sensor, como una forma de dar respuesta a las hipótesis planteadas en esta propuesta [14], algo que aquí se resuelve con una solución generalizada.

5. Conclusiones

Un método para obtener el área de cobertura o campo de visión y la resolución espacial asociada del sensor O3M del fabricante ifm ha sido presentado. Se trata de una técnica matemática que con el uso de un lenguaje de programación o

aplicaciones de hojas de cálculo puede ser implementado para fácilmente determinar cuál es el área de cobertura efectiva y la resolución espacial de la misma, cuando es usado el sensor O3M con una altura y ángulo de inclinación determinado, en aplicaciones de monitoreo inteligente. Se ha demostrado, que a pesar de que el fabricante ofrece el campo de visión a distancias operativas, no es inmediato obtener el área que ocupa el campo de visión cuando el sensor tiene un ángulo de inclinación diferente a 90°, cuya proyección en el suelo es en forma de trapecio. Esto traía como problema, que el usuario del sensor desconocía la distancia mínima y máxima en la que el sistema puede detectar el objeto, así como el área de cobertura, algo que se resuelve en este artículo. Lo resultados experimentales dan peso a lo planteado en nuestras hipótesis.

Referencias

- [1]<https://www.ifm.com/img/O3D200-brochure.pdf>
- [2][https://www.ifm.com/download/files/ifm-vision-sensors-industrial-imaging/\\$file/ifm-vision-sensors-industrial-imaging.pdf](https://www.ifm.com/download/files/ifm-vision-sensors-industrial-imaging/$file/ifm-vision-sensors-industrial-imaging.pdf)
- [3]<https://www.ifm.com/es/es/shared/technologies/3d-smart-sensor-o3m/3d-smart-sensor-o3m>
- [4]<https://www.ifm.com/us/en/shared/technologies/o3m-mobile-smart-sensor/technology/technology>
- [5]<https://ilumeyco.com/ilumeyco-idi/diferencias-entre-el-sensor-3d-y-la-camara-3d-de-la-serie-o3d-del-fabricante-ifm/>
- [6]<https://www.ifm.com/binaries/content/assets/pdf-files/en/product-news/2018/sps/updates/ifm-e2m231-robust-tft-lcd-monitor-mobile-machines-en-18.pdf>
- [7]https://www.ifm.com/us/en/category/220_020_030_020#!/S/BD/DM/1/D/O/F/O/T/50
- [8]<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html#buvr2qb-2>
- [9]https://www.researchgate.net/profile/Stefan-May-3/publication/220553389_Calibration_and_registration_for_precise_surface_reconstruction_with_Time-Of-Flight_cameras/links/00b7d52170bb9b3390000000/Calibration-and-regISTRATION-for-precise-surface-reconstruction-with-Time-Of-Flight-cameras.pdf
- [10]https://www.ifm.com/es/es/download/efe250_O3M_ifmVisionAssistant
- [11]<https://www.ifm.com/mounting/706424UK.pdf>
- [12]<https://www.ifm.com/es/es/shared/technologies/3d-smart-sensor-o3m/produktauswahl/3d-smart-sensor-o3m---produktauswahl>
- [13]<https://www.ifm.com/es/es/product/O3M261>
- [14]<https://www.ifm.com/mounting/80286758UK.pdf>